

```

printf("\n+ k=%d, t=%d",k,f);
//Поиск позиции в списке событий
for (int i=0, j=HEAD; (j>0)&&(f>=F[j]); i=j,
j=N[i]);
//Коррекция связей списка событий
N[k]=j, N[i]=k;
}
//Конструктор TPN по умолчанию
TPN::TPN(){
//Описание примера TPN
enum places {b1,b2,b3,b4,b5,b6,b7};
enum transition {a1,a2,a3,a4,af};
enum weight {w0,w1};
static int
Cx[b7+1]={0,0,0,0,0,0,0},
Dx[af+1]={0,2,3,4,10,0},
Jaox[]={ b1,b2,b6, b3,b4, b5, b1,b2, b7 },
Waiox[]={ w1,w1,w1, w1,w1, w1, w1,w1, w1 },
Iaiox[]={
0,3,5,6,8,9,sizeof(Jaiox)/sizeof(*Jaiox)},
Jbox[]={af,a1, af,a1, a2, a3, a3, a4, af},

Ibox[]={0,2,4,5,6,7,8,sizeof(Jbox)/sizeof(*J
box)},
Jaix[]={ b1,b2, b3, b4,b5, b6, b1,b2,b7},
Waix[]={ w1,w1, w1, w1,w1, w1, w1,w1,w1},
Iaix[]={
0,0,2,3,5,6,sizeof(Jaix)/sizeof(*Jaix)};
C=new int[b7+1];
for (int i=0; i<=b7; C[i++]=0);
D=Dx;
N=new int[sizeof(Dx)/sizeof(*Dx)];
F=new int[sizeof(Dx)/sizeof(*Dx)];
Iao=Iaiox;
Jao=Jaiox;
Wao=Waiox;
Ibo=Ibox;
Jbo=Jbox;
Iai=Iaix;
Jai=Jaix;
Wai=Waix;
}
//Деструктор TPN
TPN::~TPN() {
delete N;
delete F;
delete C;
}
// Тестовая программа
void main() {
TPN x;
x.interp();
}

```

Результаты работы тестовой программы:

УДК 681.51

**Тихомирова Е.В.**

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫМИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Рассматриваемые системы компаундирования предназначены для получения выходного продукта посредством смешения в заданном соотношении некоторых исходных продуктов, например на нефтехимических технологических комплексах. Все задания на смешение в установках компаундирования, формирующие портфель заказов, характеризуются

```

d=0
-k=0, t=0
+k=1, t=2
+k=4, t=10
d=2
-k=1, t=2
+k=2, t=5
d=3
-k=2, t=5
+k=3, t=9
d=4
-k=3, t=9
+k=1, t=11
d=1
-k=4, t=10
d=1
-k=1, t=11
+k=2, t=14
d=3
-k=2, t=14
+k=3, t=18
d=4
-k=3, t=18
+k=5, t=18
d=0
-k=5, t=18

```

Очевидно, что вычислительная сложность процесса обработки последствий свершения отдельного события на *TPN*:  $R=O(|a \bullet // \bullet a| |b \bullet|)$ ,  $a \in A$ ,  $b \in B$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества и полезность формальной спецификации дискретных процессов сетями Петри и их расширениями реализуются в полной мере посредством решения задачи алгоритмической интерпретации сетевых описаний. Конструктивный путь ее решения - построение специализированной имитационной системы с рекуррентной схемой алгоритма интерпретации.

Предложенные в настоящей работе схемы реализации процедур моделирования процессов на сетевых моделях обладают потенциально возможными оценками эффективности качества по критерию "память - быстродействие".

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бусленко Н.П., Калашников В.В. Лекции по теории сложных систем. -М.: Советское радио, 1973. - 440с.
2. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. -М.: Мир, 1984, - 264с.
3. Ревотюк М.П., Иванчиков А.А. Динамическое описание процессов на сетевых моделях / БГУИР - Минск, 1996. - 20 с. - Деп. в ВИНТИ 03.10.96, N6137.

ходного продукта. При создании и эксплуатации систем управления дискретными автоматизированными производствами возникает задача реализации управления, позволяющего координировать взаимодействие оборудования, определять количество и назначать уставки технологическим элементам оборудования для обеспечения заданной производительности системы, получать вероятностные временные характеристики системы, осуществлять анализ и планирование хода процесса и т.д. Решение такого рода задачи требует построение модели процесса и реализации функции управления [1].

### 1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ КОМПАУНДИРОВАНИЕМ В ТЕРМИНАХ ТЕОРИИ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Формальная постановка задачи реализации управления маршрутизацией потоков в установке компаундирования может быть определена следующим образом:

пусть технологическая установка представлена многодольным ориентированным графом  $G=(V,A)$ ,

где  $V$  – подмножество вершин графа, соответствующее элементам технологического оборудования,

$A$  – подмножество дуг, отражающее имеющиеся связи элементов;

портфель заказов  $P$  формируется заданиями на смешение  $P=\{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$ , каждое из которых характеризуется тройкой:

$$Z_i = \{U_i, V_i, t_i\},$$

где  $U_i$  – тип выходного продукта задания  $Z_i$ ,

$V_i$  – объем требуемого выходного продукта,

$t_i$  – временные сроки выполнения задания  $Z_i$ ;

тип выходного продукта предопределяет набор емкостей  $\{S_i, D_i\}$ , где  $S_i$  – емкость-источник,  $D_i$  – емкость – приемник; существует алгоритм поиска допустимых трасс реализации [2], определяющий для каждого задания  $Z_i$  набор альтернатив выполнения  $A_{ij}$  – множество маршрутов на графе  $G$  между множествами  $S_i$  и  $D_i$ .

статическое описание установки представлено структурами данных [2]:

$S1$  – список вершин,

$S2$  – список дуг,

$S3$  – описание выходных связей вершин,

$S4$  – описание входных связей вершин,

Необходимо построить модель процесса функционирования системы и реализовать процедуру управление данной моделью в реальном режиме времени.

Для формализации процесса управления представляется целесообразным применение аппарата точного описания дискретных процессов, например моделями конечных автоматов, системами векторного сложения, сетями Петри, специализированными языками и т.п., учитывающих взаимосвязи отдельных фаз процессов.

Формализация процесса управления компаундированием в терминах сетей Петри [3] может быть представлена четверкой:

$$C=(A, B, I, J),$$

где  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  – конечное множество переходов, отражающих события сети,  $m \geq 0$ ;

$B=\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$  – конечное множество позиций - условия возникновения событий,  $n \geq 0$ ;

$I:A \rightarrow B^\infty$  – входная функция, отображающая переход  $a_i \in A$  в множество выходных позиций перехода  $I(a_i) \in B$ ;

$J:A \rightarrow B^\infty$  – выходная функция, отображающая переход  $a_i \in A$  в множество входных позиций перехода  $J(a_i) \in B$ .

Каждый элемент множества  $A$  характеризуется типом *type* и параметром задержки

$$d_i: a_i = \{type, d_{ij}, type: \{a_{oi}, a_{vi}, a_{ij}\},$$

где  $a_{oi}$  – планирование задания,

$a_{vi}$  – селекционирующий переход,

$a_{alti}$  – выполнение задания по выбранному маршруту.

Элементы множества  $B$  могут характеризовать следующие состояния системы  $\{b_{ozi}, b_{szi}, b_g, b_{alti}, b_{fzi}\}$ :

где  $b_{ozi}$  – поступление задания на планирование,

$b_{szi}$  – готовность задания к запуску на выполнение,

$b_g$  – возможность прохождения трассы по выбранному маршруту,

$b_{alti}$  – разрешение запуска маршрута на выполнение,

$b_{fzi}$  – завершение выполнения задания.

Графическое представление модели может быть представлено в виде двухдольного ориентированного мультиграфа сети Петри:

$$G=(V, P),$$

где  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_s\}$  – множество вершин,  $V=A \cup B$ ;

$A \cap B = \emptyset$ , для  $\forall p_k \in P$ ,

$P=\{p_1, p_2, \dots, p_r\}$  – комплект направленных дуг  $p_k=(v_i, v_j)$ ,  $(v_i, v_j) \in V$ .

Оговариваются некоторые особенности графического построения модели процесса выполнения портфеля заказов (рисунки 1):

1. Выполнение задания может быть представлено переходом  $a_{zi}$  и соответствующими ему состояниями  $b_{szi}$  – готовности задания к выполнению и  $b_{fzi}$  – завершения выполнения задания.
2. Для отражения процесса “занятия – освобождения” технологического оборудования при выполнении задания, а также для обеспечения синхронизации выполнения заданий – вводится дополнительная позиция  $b_g$ . При готовности задания к выполнению наличие метки в позиции  $b_g$  означает, что все оборудование, входящее в маршрут данного задания свободно, т.е. задание может начать свое выполнение. После окончания выполнения задание происходит процесс освобождения занимаемого оборудования, отражаемый возвратом метки обратно в позицию  $b_g$ . Ввод позиции  $b_g$  препятствует также одновременному запуску заданий по пересекающимся трассам.
3. Ввод временной задержки  $d_i=t_i$   $d_i \in D$  перехода  $a_{alti}$  отражает длительность процесса выполнения задания. Временные задержки всех остальных переходов предположительно равны 0.
4. Последовательность запуска заданий на выполнение может быть определена заданием соответствующей конфигурации цепочки управления и назначением фишек в управляющие позиции  $b_{ozi}$ . Пример цепочки управления запуском заданий  $Z_1, Z_2$  и  $Z_3$  обеспечивающей параллельный запуск заданий  $Z_1, Z_2$  и последовательный запуск задания  $Z_3$  после выполнения  $Z_2$  представлен на рисунке 1.
5. При наличии нескольких допустимых трасс выполнения задания выбор альтернативы осуществляется вводом селекционирующего перехода  $a_{vi}$ , назначающего приоритеты альтернативам задания и соответствующей ему позиции  $b_{alti}$ , отражающей состояние готовности выбранной альтернативы к запуску на выполнение.

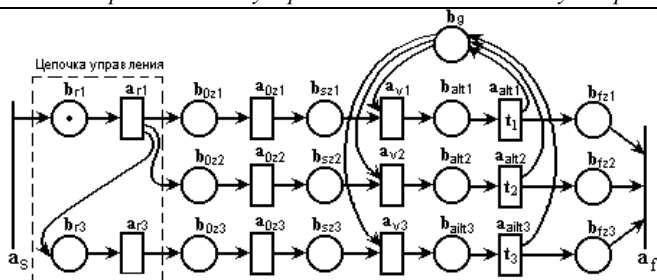


Рисунок 1 – Графическое представление модели процесса выполнения портфеля заказов.

## 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ВРЕМЕННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ СИСТЕМЫ

Преимуществом предложенной к рассмотрению модели может служить то, что она легко может быть модифицирована для учета технологических и временных ограничений. Примером таких ограничений может случить невозможность выполнения тех или иных заданий на конкретном виде технологического оборудования или строгая фиксация сроков начала и (или) завершения выполнения заданий. Таким образом, возникает частная подзадача учета ограничений накладываемых на систему.

Для учета временных ограничений, связанных с выполнением заданий (рисунок 2), вводятся дополнительных временных переходов, не позволяющих заданию начать свое выполнение раньше указанного срока или завершить выполнение позже указанного срока. Так дополнительный переход  $a_{d1}$  не позволяет заданию  $Z_1$  начать свое выполнение раньше времени  $t_{d1}$ . Аналогично для второго задания – все вершины сети, которые занимает задание  $Z_2$ , будут освобождены к моменту времени  $t_{b2}$ , вводом дополнительного перехода  $a_{b2}$ .

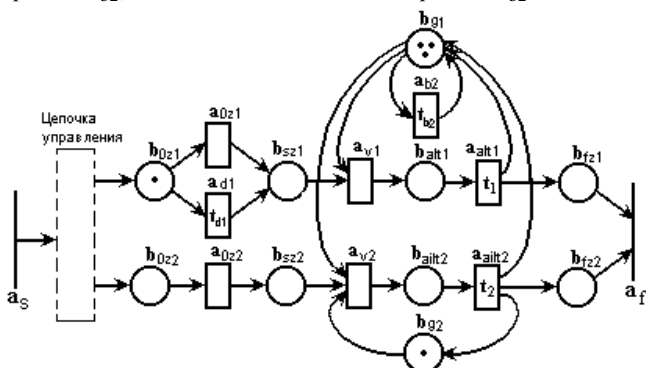


Рисунок 2 – Графическое решение технологических и временных ограничений.

Ограничение на использование конкретных единиц оборудования может быть учтено путем разделения множества вершин  $G$  графа технологической установки, на котором отображается процесс занятия-освобождения вершин выполняемым заданием, соответствующего позиции  $b_g$  на подмножества  $G_1, G_2, \dots, G_k$  и соответствующим им вводом дополнительных позиций  $b_{g1}, b_{g2}, \dots, b_{gk}$  (рисунок 2). Так, если через некоторые технологические элементы установки невозможно прохождение трасс обоих заданий, то для избежания конфликтных ситуаций необходимо разделение множества  $G$  на два подмножества таким образом, что

$$G_1 \cup G_2 = G,$$

$G_1 \cap Z_1 \neq \emptyset \text{ \& } G_1 \cap Z_2 = \emptyset$ , т.е. подмножество  $G_1$  включает элементы доступные для обоих заданий  $Z_1$  и  $Z_2$ .

$G_1 \cap Z_1 = \emptyset \text{ \& } G_1 \cap Z_2 \neq \emptyset$ , подмножество  $G_2$  включает элементы доступные для задания и не включает элементы, доступные для задания  $Z_1$ .

Таким образом, построенная модель является универсальной и позволяет решать задачи управления. Если внешняя критериальная функция не определена, то независимое управление осуществляется путем нахождения строгого решения методом полного перебора всех возможных последовательностей запуска заданий на выполнение, определяемых состоянием элементов цепочки управления и вариации альтернатив выполнения заданий, путем задания приоритетов синхронизирующими переходами. Так как установка компаундирования включает в себя около 2000 единиц технологических элементов оборудования, то решаемая задача управления относится к задачам с большой вычислительной сложностью, следствием которой являются большие временные затраты на вычислительный процесс [4]. Для полного перебора всех возможных вариантов выполнения заданий, формирующего портфель заказов, количество вариантов перебора  $D$ :

где  $Z$  – номер задания,

$L_z$  – количество альтернатив в задании  $Z$ ,

$n$  – количество заданий в портфеле заказов.

$$D = \prod_{z=1}^n L_z n!$$

Уменьшить временные затраты представляется возможным путем кооперирования нескольких ЭВМ для решения поставленной задачи управления [5].

Для решения задач управления с заданной внешней критериальной функцией, частным случаем которой является составление минимального по временным срокам плана выполнения портфеля заказов, требуется применение специальных алгоритмов поиска оптимальных решений.

## 3. ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ

В условиях сложной сети трубопроводов для каждого задания, как правило, существует несколько возможных альтернативных маршрутов его выполнения, каждый из которых характеризуется набором и состоянием занимаемых единиц оборудования и продолжительностью выполнения. Задача составления оптимального плана сводится к определению для каждого задания условий его реализации, критерием оптимальности при этом является максимальная загрузка оборудования при безусловном выполнении календарных сроков отдельных заказов.

Исходными данными для решения задачи являются:

портфель заказов на смешение  $P$ ,

технологическая установка имеет статическое описание в виде графа  $G$ ,

алгоритм поиска допустимых трасс реализации [2],

модель процесса управления установкой компаундирования, реализованная сетью Петри.

Необходимо составить оптимальный план выполнения заданий, при котором достигается минимальное время выполнения всего портфеля заказов  $P$ .

Предлагаемый алгоритм построения оптимального плана базируется на волновой схеме порождения маршрутов на однодольном ориентированном графе с учетом дополнительных технологических ограничений на порождение альтернатив. Процесс порождения маршрутов реализуется по схеме “сначала вглубь, затем вширину”, при этом этап реализации во времени отображается на список событий.

Множество состояний отдельных вершин графа:

*passive* – еще не рассмотренная вершина графа;

*active* – текущая вершина ;

*visited* - просмотренная вершина;  
*storage* - пропускаемая "тупиковая" вершина.

Укрупненная схема алгоритма решения задачи:

**Шаг 1.** Установка пометок всех вершин дерева как "*passive*".

**Шаг 2.** Фиксация корней дерева трасс (число деревьев равно количеству альтернатив заданий) в первых элементах стека просмотренных вершин и вычисление времени окончания их выполнения  $t_i$ .

**Шаг 3.** Вычисление текущего оптимального времени выполнения всех заданий  $t_{opt} = \sum \max\{t_{ki}\} \quad i=(0, k)$ ,

где  $k$  - количество заданий,

$t_{ki}$  - время окончания выполнения  $i$ -й альтернативы  $k$ -го задания

**Шаг 4.** Выполнение процедуры анализа текущих состояний вершин дерева: все вершины, помеченные как "*passive*" у которых  $t_i > t_{opt}$  помечаются как "*storage*".

**Шаг 5.** Выбор из множества вершин с меткой "*passive*" вершины с минимальным временем окончания выполнения. Если такая вершина найдена, то она становится текущей и помечается как "*actived*", иначе процесс поиска завершен - переход на шаг 10.

**Шаг 6.** Планирование развития очередной ветви дерева из текущей вершины.

**Шаг 7.** Если имеется не просмотренная ветвь дерева, то выполняется процедура вычисления времени окончания выполнения порожденной вершины с учетом возможности ее параллельного выполнения с ранее рассмотренными и переход на шаг 6.

**Шаг 8.** Если очередь просматриваемых выходных связей у текущей вершины пуста, то пометка ее как "*visited*" и выполнение проверки достижимости полной глубины дерева.

**Шаг 9.** Если текущая вершина является конечной вершиной ветви дерева и для нее выполняется условие  $t_i < t_{opt}$ , происходит установка указателя оптимальной альтернативы на данную ветвь дерева.

иначе пометка текущей вершины как "*storage*" и переход на шаг 3.

УДК 608.16

**Строкач П.П., Житенев Б.Н., Яловая Н.П., Житенева Н.С.**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ВОДЫ

Подземные воды, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения, отличаются стабильностью состава: имеют невысокое соледержание и незначительные колебания температуры. По основным показателям они соответствуют требованиям Санитарных правил и норм Республики Беларусь (СанПиН РБ) /5/. Однако вода из артезианских скважин, используемая для водоснабжения г. Дрогичина, не удовлетворяет вышеназванным требованиям по содержанию железа. В связи с неудовлетворительной работой сооружений по обезжелезиванию воды, на кафедре инженерной экологии

**Шаг 10.** Вызов процедуры регистрации оптимального плана выполнения портфеля заказов по указателю она оптимальную альтернативу и завершение процедуры решения задачи.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель динамических процессов компаундирования в терминах сетей Петри позволяет решать задачи управления: независимого и с заданной внешней критериальной функцией. Приведенный способ графического решения отличается универсальностью и позволяет учесть временные и технологические ограничения, накладываемых на систему.

Предложенный алгоритм составления оптимального плана выполнения портфеля заказов практически использован при объектно-ориентированном проектировании системы управления маршрутизацией потоков в установках компаундирования.

Проведенные имитационные эксперименты с моделью при размерности схемы технологической установки 2000 единиц оборудования, характерной для нефтеперерабатывающих заводов, показали приемлемое время решения для использования в производственных условиях.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. - М.: Наука, 1978. - 400 с.
2. Ревотюк М.П., Тихомирова Е.В. Поиск и представление допустимых технологических маршрутов в установках компаундирования- Труды региональной конференции молодых ученых и студентов, Брест: БПИ, 2000г.- С. 49-52.
3. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. -М.: Мир, 1984, - 264с.
4. Липский В. Комбинаторика для программистов- М.: Мир, 1988. 608 с.
5. Тихомирова Е.В. Анализ потенциальной эффективности кооперативных схем решения задач дискретной математики - Труды региональной конференции молодых ученых и студентов, Брест: БПИ, 2000г.- С. 52-55.

и химии Брестского государственного технического университета (ИЭиХ БГТУ) проведены исследования по влиянию физико-химических и технологических факторов на процесс обезжелезивания.

Известно /1, 2, 3/, что железо в природных водах может присутствовать в виде соединений:

- ионов железа (II);
- истинно-растворенных органических соединений железа (II) и железа (III);
- коллоидных органических и неорганических соединений.

**Строкач Петр Павлович.** Профессор, к.т.н., зав. каф. инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.

**Житенев Борис Николаевич.** К.т.н., доцент каф. водоснабжения, водоотведения и теплоснабжения Брестского государственного технического университета.

**Яловая Наталья Петровна.** Ст. преподаватель каф. инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.

**Житенева Наталья Сергеевна.** Ст. преподаватель каф. начертательной геометрии и инженерной графики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.