

11. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Шаманов В.И. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учебное пособие для вузов ж.д. трансп./ Под ред. Вл.В. Сапожникова. – М.: Маршрут, 2003. – 263 с.

12. Станционные системы автоматики и телемеханики: Учеб. для вузов ж.д. трансп. / Вл.В. Сапожников, Б.Н. Елкин, И.М. Кокурин и др.; Под. ред. Вл.В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1997. – 432 с.

УДК 62-50

*Панченко С.В., к.т.н., проректор (УкрДАЗТ)*

### К ПОСТРОЕНИЮ КВАЗИДВУНАПРАВЛЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

**Введение.** При моделировании различных транспортных систем возникает задача перераспределения направления движения подвижных единиц. Эта задача может быть решена путем нового специального расширения сетей Петри.

**Постановка задачи.** Ставится задача синтеза сети Петри (СП) с определением последовательности функционирования (цвет дуги), минимально возможного числа ( $\Psi(J)$ ) и направления (знак  $S_j$ ) срабатываний переходов.

**Решение задачи.** На рисунке 1 приведена СП.

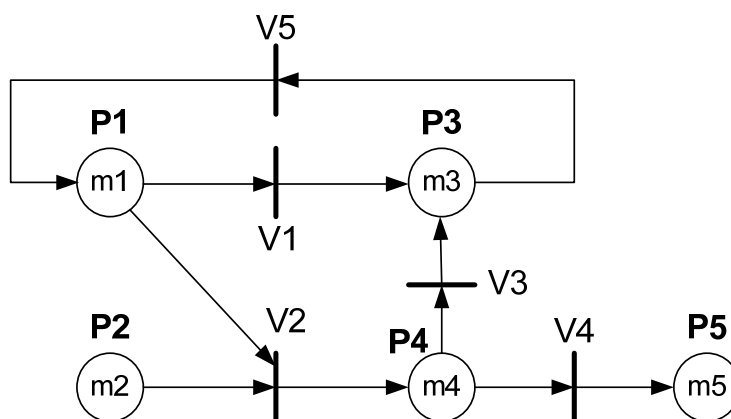


Рисунок 1 - Пример однонаправленной СП

В таблице 1 дана матрица  $K_{ij}$  описывающая массив дуг; первый столбец указывает номер позиции, из которой выходит дуга, второй столбец – номер перехода, в который входит дуга, третий столбец – вес дуги, а четвертый - цвет.

Таблица 1 – Матрица  $K_{ij}$  описывающая массив дуг

$K_{ij} =$	Номер позиции $P_i$	Номер перехода $V_j$	Вес дуги	Цвет дуги
	1	1	1	Устанавливается после моделирования (УПМ)
	1	2	1	
	2	2	1	
	3	1	1	
	4	4	1	
	4	3	1	
	5	выход	1	

Аналогично в таблице 2 записывается матрица  $K_{ji}$ , в ней описаны дуги, соединяющие переходы с позициями

Таблица 2 - Матрица  $K_{ji}$

$K_{ji} =$	Номер позиции $P_i$	Номер перехода $V_j$	Вес дуги	Цвет дуги
	1	3	1	УПМ
	2	4	1	УПМ
	3	2	1	УПМ
	4	5	1	УПМ
	5	3	1	УПМ

Совокупность переходов СП задается вектором

$$V_j = \{V_1, V_2, \dots, V_j\}. \quad (1)$$

Матрицей (2) задается начальная разметка (маркировка) состояния позиций, в которых могут размещаться цветные метки (различный ресурс).

В круглых скобках на первой позиции указываем цвет, а на второй – ресурс (количество меток)

$$M_0 = \begin{matrix} & P_1 & P_{21} & P_3 \\ \begin{matrix} (0,3) \\ (0,5) \\ (0,2) \end{matrix} & & & \end{matrix} \quad (2)$$

В соответствии с таблицей 1 и таблицей 2 на декартовых произведениях  $I \times J$  и  $J \times I$  составляются матрицы инцидентности  $I(IJ) = I \times J$ , связывающие дугами  $K_{ij}$  соответствующие позиции с переходами и соответствующие матрицы инцидентности  $O(JI) = J \times I$ , связывающие дугами  $K_{ji}$  переходы с позициями

$$I(IJ) = \begin{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \end{matrix} & \end{matrix}, \quad O(JI) = \begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \end{matrix} & \end{matrix} \quad (3)$$

Может быть записана матрица  $D = C(IJ)$  инцидентий изменения разметок позиций СП при срабатывании каждого из переходов [3,5]. Эта матрица составляется из матриц инцидентности  $I(IJ)$  и  $O(JI)$  по следующей формуле

$$D = C(IJ) = O(JI) - I(IJ). \quad (4)$$

В каждой позиции  $C_{ij}$  этой матрицы будет записан результат вычисления разности значений числа маркеров, записанных в клетках матриц  $O(JI)$  и  $I(IJ)$  с одинаковыми индексами. Фактически матрица  $C(IJ)$  показывает количество маркеров, изымаемых из указанных позиций и добавляемых в соответствующие позиции при срабатывании каждого из переходов.

$$D = C(IJ) = \begin{matrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \end{matrix} & \end{matrix} \quad (5)$$

В транспортных системах направление движения подвижных единиц (ПЕ) по одним и тем же путям может быть двунаправленным. Например, это имеет место при организации движения по однопутным участкам железнодорожного транспорта, рельсового транспорта городов, метрополитенов, при организации маневрового движения на железнодорожных станциях и т.п. Для случая двунаправленного движения введем матричное уравнение

$$M_k(I,Z) = M_0 + C(IJ) * S\Psi_j,$$

где  $S\Psi_j$  – вектор-столбец минимально возможного количества циклов  $\Psi_j$  и направления (знак  $S$ ) срабатываний каждого из  $V_j$  переходов;

$M_k$  – разметка на цикле  $k=(1, 2, \dots, \Psi_j)$ .

Из (10) легко находится искомый вектор минимального числа и направления срабатываний каждого из переходов:

$$S\Psi_j = (M_k(I,Z) - M_0) * C(IJ)^{-1}. \quad (6)$$

Составим матричное уравнение

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & =1 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s\Psi_1 \\ s\Psi_2 \\ s\Psi_3 \\ s\Psi_4 \\ s\Psi_5 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Решая это уравнение, находим минимальное число срабатываний соответствующих переходов:  $s\Psi_1=7$ ,  $s\Psi_2=5$ ,  $s\Psi_3=0$ ,  $s\Psi_4=5$ ,  $s\Psi_5=9$ . Сумма срабатываний всех переходов равна 26. Все направления перемещения маркеров – положительные, т.к. все знаки положительные ( $s_j=+1$ ), т.е. маркеры перемещаются в одном направлении.

Для моделирования ситуаций с двунаправленным движением ПЕ введем новый квазидвунаправленный переход, который позволяет позиции  $P_i$ ,  $P_{i+1}$  и переход  $V_j$  соединить в квазидвунаправленный биграф, приведенный на рисунке 2а. Стрелкой, показанной справа, может быть указано начальное направление движения. Используя введенное свойство квазидвунаправленности, изменим структуру СП, исключив переход  $V_5$  (рисунок 1), и введем квазидвунаправленные переходы  $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$  как

показано на рисунке 2б.

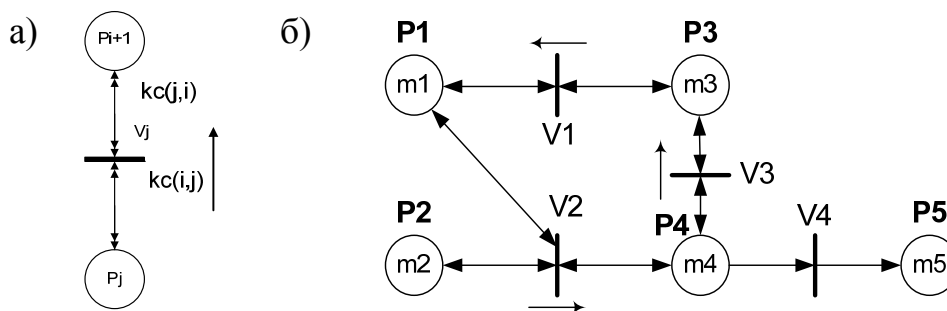


Рисунок 2 - Квазидвунаправленный биграф - а) и модельная квазидвунаправленная СП - б)\*

Матрицы инцидентности для графа рисунке 2б имеют вид

$$I(IJ) = \begin{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \end{matrix} & \end{matrix} \quad O(JI) = \begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \end{matrix} & \end{matrix} \quad (8)$$

На основе матриц (8) составим матрицу  $D^-$  "изъятий" меток из позиций  $P_i$  при срабатывании соответствующих переходов  $V_j$  и матрицу "добавлений" меток в позиции  $P_{i+1}$  при срабатывании соответствующих переходов  $V_j$ .

$$D^-(IJ) = \begin{matrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \end{matrix} & \end{matrix} \quad D^+(IJ) = \begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \end{matrix} & \end{matrix} \quad (9)$$

\* одинарные стрелки соответствуют транспортным дугам (по ним передается ресурс), а двойные – конвейерным дугам (по ним передается информация),  $kc$  – вес дуги.

Тогда матрица динамики срабатывания СП равна

$$D = C(IJ) = D^+ + D^- = \begin{matrix} & \begin{matrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} & \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{matrix} \quad (10)$$

Составив матричное уравнение

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s\psi_1 \\ s\psi_2 \\ s\psi_3 \\ s\psi_4 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

получим его решение, из которого находим минимальное число срабатываний соответствующих переходов:  $s\psi_1=-2$ ,  $s\psi_2=5$ ,  $s\psi_3=0$ ,  $s\psi_4=5$ , Сумма срабатываний всех переходов равна 12. Направление срабатывания перехода  $V_1$  – отрицательное, т.к.  $s_1=-1$ . Разделив сумму срабатываний переходов СП (рисунок 1) на СП (рисунок 2), получим повышение производительности второй СП в 2.16 раз.

Заменим структуру СП путем изменения направления срабатывания перехода  $V_1$  на противоположное. Схема этой СП приведена на рисунке 3.

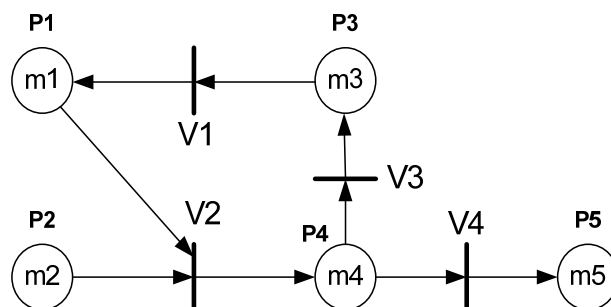


Рисунок 3 – Результирующая сеть Петри

В этой синтезированной СП все направления срабатывания переходов положительны. В этом можно убедиться путем решения матричного уравнения по изложенному методу.

График динамики изменения разметок (ситуаций)  $M_{j,k}$  во времени отображен на рисунке 4. Этот график описывает логико-динамический процесс изменения разметок СП.

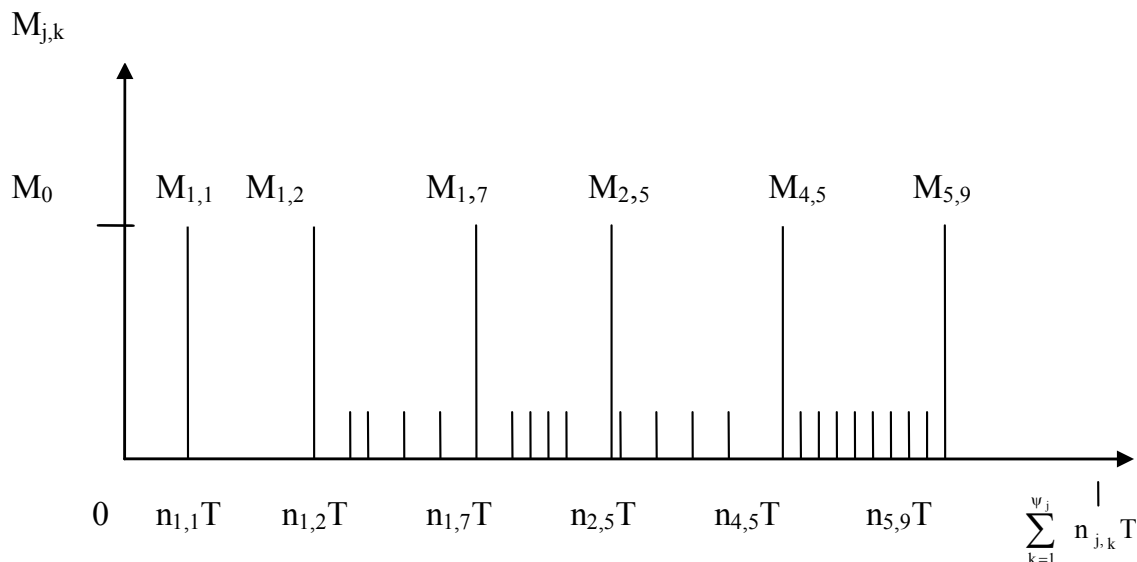


Рисунок 4 - График динамики изменения разметок (ситуаций) во времени для СП (рисунок 2)

Дискретная аппроксимация с помощью дискретного  $Z$ -преобразования Лапласа позволяет получить следующие передаточные функции в виде произведения операторов времени задержки срабатывания каждого из  $V_j$  переходов, т.е. получить дискретные передаточные функции задержки срабатывания.: Произведение дискретных передаточных функций задержки срабатывания каждого из  $V_j$  переходов обусловлено последовательным характером изменения разметок при переходе из одной позиции в другую в процессе срабатывания переходов.

Для первой СП (рисунок 2)

$$W_{j,k}(I, Z) = Z^{\sum_{k=1}^7 -n_{1,k}} * Z^{\sum_{k=1}^5 -n_{2,k}} * Z^{\sum_{k=1}^5 -n_{4,k}} * Z^{\sum_{k=1}^9 -n_{5,k}}$$

$$W_{j,k}(I, Z) = W_{1,1}(I, Z) * W_{1,2}(I, Z) * W_{2,1}(I, Z) * \dots * W_{5,9}(I, Z) = Z^{-T(n_{1,1} + n_{1,2} + n_{1,3} + n_{1,4} + n_{1,5} + n_{1,6} + n_{1,7} + n_{2,1} + n_{2,2} + n_{2,3} + n_{2,4} + n_{2,5} + n_{4,1} + n_{4,2} + n_{4,3} + n_{4,4} + n_{4,5} + n_{5,1} + n_{5,2} + n_{5,3} + n_{5,4} + n_{5,5} + n_{5,6} + n_{5,7} + n_{5,8} + n_{5,9})}$$
(12)

где  $t=n_{j,k}T$  - момент времени;  
 $j$ - номер перехода;  
 $n_{j,k}$  – число  $n_j$  тактов дискретизации  $T$  срабатываний перехода  $V_j$  в цикле  $k=1, \psi_j$  для разметки  $M_{j,k}$ , причем  $n_{j,1} \neq n_{j,2} \neq \dots \neq n_{j,\psi_j}$

Для синтезированной результирующей СП максимальной производительности (рисунок 3)

$$W_{j,k}(I,Z) = Z^{-T(n_{1,1} + n_{1,2} + n_{2,1} + n_{2,2} + n_{2,3} + n_{2,4} + n_{2,5} + n_{4,1} + n_{4,2} + n_{4,3} + n_{4,4} + n_{4,5})}. \quad (13)$$

С использованием операции замыкания для целей структурирования сетей, синтезированная СП (рисунок 3) может быть представлена обобщенной структурой, приведенной на рисунке 5.

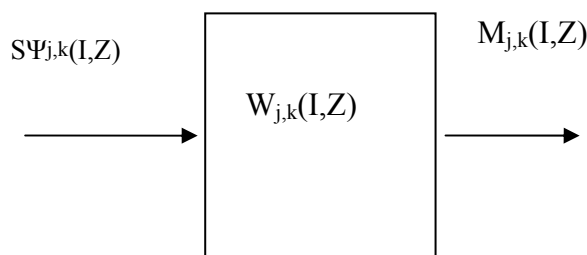


Рисунок 5 - Структурированная СП

$Z$ -изображение текущей разметки позиции  $P_i$  при срабатывании перехода  $V_j$  на такте  $k$ , соответственно, равно

$$M_{j,k}(I, Z) = M_0(I, Z) + W_{j,k}(I, Z) * C(I, J) * S\Psi_{j,k}(I, Z), \quad (14)$$

изменение изображения текущей разметки равно

$$\begin{aligned} \Delta M_{j,k}(I, Z) &= M_{j,k}(I, Z) - M_0(I, Z) = \\ &= W_{j,k}(I, Z) * C(I, J) * S\Psi_{j,k}(I, Z), \end{aligned} \quad (15)$$



а ее оригинал, представляющий собой логико-динамический процесс изменения разметок, относительно текущего момента времени  $t$  равен

$$\begin{aligned} \Delta M_{j,k}(I, t + \sum_{k=1}^{\psi_j} n_{j,k} T) &= M_{j,k}(I, t + \sum_{k=1}^{\psi_j} n_{j,k} T) - M_0(I, t) = \\ &= W_{j,k}(I, t + \sum_{k=1}^{\psi_j} n_{j,k} T) * C(I, J) * S\Psi_{j,k}(I, t). \end{aligned} \quad (16)$$

С использованием предложенного математического аппарата обобщенная процедура моделирования работы сети Петри показана на рисунке 6.

Блоки 1, 2, 3, 4 реализуются матричными и логическими операторами, определяющими логику изменения разметок в соответствующих позициях с учетом динамики срабатывания переходов на интервале времени  $n_{j,k}T$ , а 6 – логическим, что выгодно отличает СП в сравнении с булевой алгеброй и облегчает их применение при моделировании логико-динамических технологических процессов.

**Расширение.** Таким образом предложено, расширение, которое заключается в дополнении существующих элементов языка СП новыми элементами (специальными дугами и их соединениями - рисунок 2а), введенными с целью увеличения изобразительных средств языка. Так, например, задержка метки во времени на любое число шагов моделирования может быть осуществлена структурой рисунка 5, которая включает дискретную передаточную функцию задержки срабатывания  $V_j$  перехода  $W(J, Z) = Z^{-\sum_{j,k} n_{j,k} T}$  на  $k$  тактов дискретного времени  $\sum n_{j,k}T$  и представляет модель обслуживания.

В таблице 3 отображены новые возможности предложенного нами расширения СП и представляющие собой новый класс квазидвунаправленных СП, у которых знаки срабатывания переходов могут принимать положительные и отрицательные значения для прямого и противоположного направления перемещения меток. Целые значения количества меток в позиции применяют для четких чисел, множеств четких чисел, а также модальных значений и границ нечетких чисел, а дробные значения количества меток - для обозначения нечетких чисел и множеств.

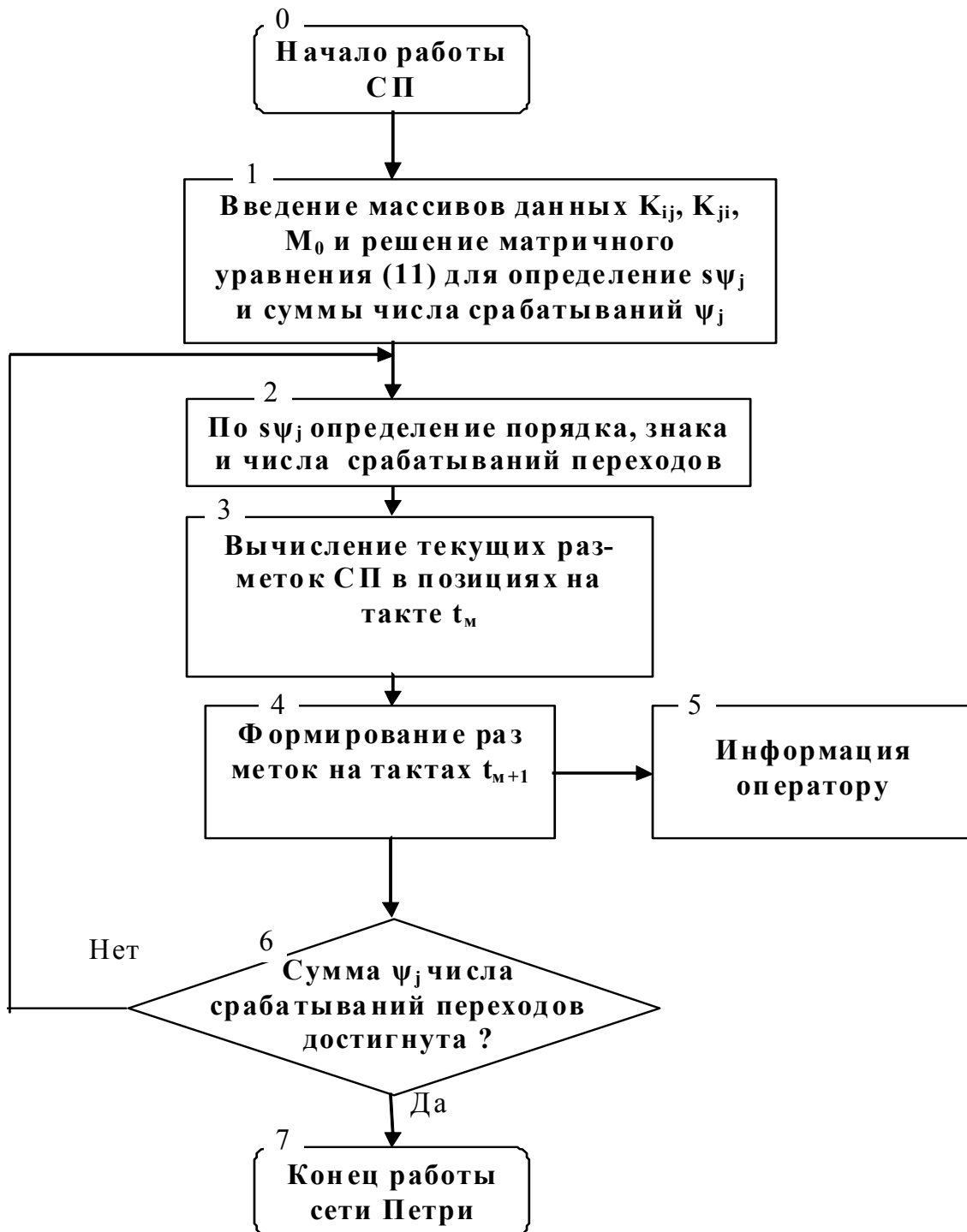


Рисунок 6 - Обобщенная процедура моделирования работы сети Петри

Таблица 3 - Конфигурации классов СП

Новое расширение	Назначение
Соответствует любым классам СП и содержат квазидвунаправленные транспортные и конвейерные дуги рис. 2а. и рис. 3а.	Применяется для моделирования дискретно-логических систем с изменением направления движения подвижных единиц
	Применяется для моделирования логико-динамических систем с изменением направления движения подвижных единиц

Следовательно, предложенное расширение СП отвечает задачам моделирования ряда технологических процессов в транспортных системах городского рельсового и железнодорожного транспорта.

**Перспективы.** Актуальной проблемой транспортных систем является разработка методов исследования функционирования систем в условиях неопределённости. При этом необходимо учесть следующие факторы:

- наличие большого числа подсистем со сложными взаимными связями;
- асинхронность функционирования элементов системы;
- нечёткий характер поведения отдельных подсистем, переменных и их характеристик

Перспективным средством моделирования неопределённости поведения и структуры систем должно стать обобщение СП, основанное на современной математической концепции – теории нечетких множеств [1, 2, 4]. Здесь приемлемо несколько подходов. Во-первых, необходимо учитывать неопределённость количества фишек в позициях сети. Во-вторых, использовать систему продукционного нечеткого вывода при срабатывании переходов, а также нечёткость матрицы динамики срабатывания и длительности циклов  $n_{j,k}T$  срабатывания переходов временной СП[6,7].

**Выводы:**

1. Для синтеза транспортных систем и эффективного управления ими, важна разработка методов моделирования, аппарат которых приближен к лингвистической природе мышления человека.

2. Новое расширение СП, обладая большой гибкостью, высокой моделирующей мощностью, а также наглядностью и удобством использования, может быть с успехом применено в исследовании оптимальных по быстродействию дискретно-событийных динамических систем.

### *Список литературы*

1. Бондарев В.Н., Аде Ф.Г. Искусственный интеллект: Учеб. пособие для вузов.- Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. - 615 с.
2. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А., Управление производством при нечеткой исходной информации. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
3. Котов В.Е. Сети Петри. - М.: Наука, 1984. - 160 с.
4. Леоненков А. В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.
5. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. - М.: Мир, 1984. - 235с.
6. Murata T. Petri nets: properties, analysis and applications // Proceedings of the IEEE. - April 1989. - Vol. 77, no. 4. - P. 541 — 580.
7. Загарий Г.И., Тимошенко Е.В. Исследование дискретно-событийных систем железнодорожного транспорта. Часть 1. Алгебра сетей Петри (ОБЗОР) // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.- 2005.- №3. – С.70-74.

**УДК 656.254.16**

*Саенко А.С., инженер (Донецкая жд)*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ПОМЕХ ПО ОСНОВНОМУ КАНАЛУ ПРИЁМА НА КАЧЕСТВО СВЯЗИ СТАНДАРТА GSM-R**

**Введение.** С позиций внедрения новых систем технологической железнодорожной радиосвязи рассматривается переход на современный цифровой стандарт GSM-R. При проектировании сетей этого стандарта возникает ряд новых задач, одна из которых – обеспечение внутрисистемной электромагнитной совместимости с учетом требований к сетям технологической радиосвязи. В данной работе проведены результаты, проведенного автором, экспериментального исследования