М.С. Романов

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОПОЛНЕНИЙ СЕТИ ПЕТРИ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОВД ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ МАССОВЫХ БЕСПОРЯДКОВ

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS AND FUNCTIONAL ADDITIONS OF THE PETRI NETWORK FOR DECISION-MAKING OF LAW-ENFORCEMENT BODIES AT EMERGENCE OF MASS RIOTS

Рассматривается модель действий группы изъятия по пресечению массовых беспорядков, вызванных межнациональным конфликтом на основе сети Петри. Решается задача определения порядка срабатывания конкурирующих переходов при моделировании действий группы изъятия. Разработано функциональное дополнение, определяющее порядок срабатывания множества конкурирующих переходов и алгоритм работы сети Петри для принятия решений ОВД при возникновении массовых беспорядков.

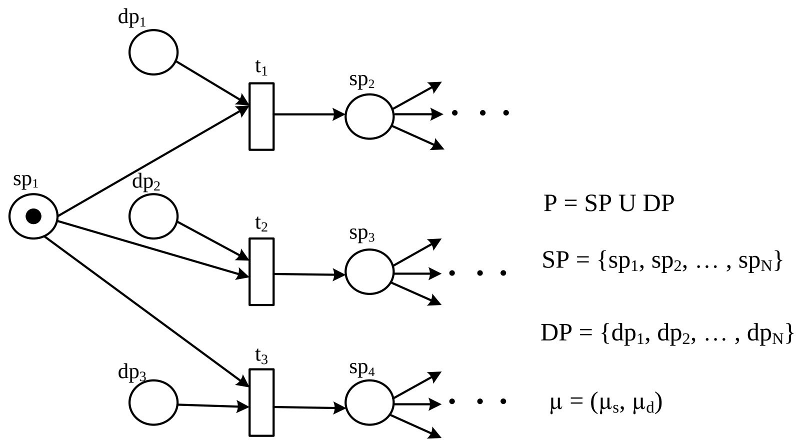
The article considers a Petri net as a modelling tool action group exemption for the suppression of riots caused by ethnic conflict. The problem of definition of an order of operation of the competing transitions when modeling network functioning of Petri is solved. The addition defining an order of operation of a set of the competing transitions when modeling network functioning of Petri and algorithm of network functioning of Petri for decision-making of Law-Enforcement Bodies at emergence of mass riots is developed.

Введение. При возникновении чрезвычайных обстоятельств (ЧО) от эффективности принимаемых решений органами внутренних дел напрямую зависят жизни людей, безопасность общества. В свою очередь эффективность управления имеющимися силами и средствами для ликвидации ЧО будет достигать высокого уровня, если заранее определить порядок этих действий для наиболее вероятных развитий чрезвычайных обстоятельств.

Учитывая специфику деятельности органов внутренних дел, использование сетей Петри для оптимизации процессов принятия решений при возникновении чрезвычайных обстоятельств является целесообразным и перспективным [1, 2]. В [3] предлагалось разработать алгоритмы принятия наиболее эффективных решений для ликвидации как самих чрезвычайных обстоятельств, так и их последствий. Последствия ЧО могут быть представлены в виде маркированной сети Петри:

$$M = (P, T, I, O, \mu), \tag{1}$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ — конечное множество позиций; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ — конечное множество переходов; I — входная функция, отображающая переход t_j в множество позиций $I(t_j)$; O — выходная функция, отображающая переход t_j в множество позиций $O(t_j)$; μ (маркировка) — функция, отображающая множество позиций P в множество неотрицательных целых чисел N.



SP — множество позиций, соответствующих состояниям системы;
DP— множество позиций, соответствующих принимаемым решениям.

Рис. 1. Пример сети Петри

Матричная форма определения сети Петри (P, T, D^-, D^+) позволяет дать определения в терминах векторов и матриц, где $D^-[j, i] = \#(p_i, I(t_j))$ — определяет входы в переходы, $D^+[j, i] = \#(p_i, O(t_j))$ — определяет выходы из переходов. Рассмотрим работу сети Петри в матричном виде.

Пусть переход t_j представляется m-вектором, содержащим нули везде, за исключением j-й компоненты. Переход t_j представляется m-вектором $e[j]$. Переход t_j в маркировке μ разрешен, если $\mu \geq e[j]\cdot D^-$, а результат запуска перехода t_j в маркировке μ записывается как

$$\delta(\mu, t_j) = \mu + e[j]\cdot D, \qquad (2)$$

где $D = D^+ - D^-$ — составная матрица изменений.

Тогда для последовательности запусков переходов $\sigma = t_{j1}t_{j2}\ldots t_{jk}$ имеем:

$$\delta(\mu, \sigma) = \delta(\mu, t_{j1}, t_{j2}, \ldots t_{jk}) = \mu + (e[j1] + e[j2] + \ldots + e[jk])\cdot D = \mu + f(\sigma)D. \qquad (3)$$

Вектор $f(\sigma) = e[j_1] + e[j_2] + \ldots + e[j_k]$ из равенства (3) называется вектором запусков последовательности $t_{j1}t_{j2}\ldots t_{jk}$. А $f(\sigma)_i$ (i-й элемент вектора $f(\sigma)$) — это число *запусков перехода* t_i в последовательности $t_{j1}t_{j2}\ldots t_{jk}$.

Матричная теория сетей Петри является инструментом для решения проблемы достижимости. Предположим, что при возникновении чрезвычайной ситуации состояние сил и средств ОВД соответствует маркировке μ. Для обеспечения безопасности жизни людей необходимо последовательно принимать управленческие решения для достижения маркировки μ', в которой чрезвычайные обстоятельства ликвидированы, если это возможно, или их воздействие приносит наименьший вред. Таким образом, задача сводится к поиску неотрицательного целого решения $f(\sigma)$ следующего матричного уравнения для x:

$$\mu' = \mu + f(\sigma)\cdot D. \qquad (4)$$

Решение $f(\sigma)$ и будет являться тем алгоритмом действий органов управления ОВД при возникновении чрезвычайных обстоятельств: $f(\sigma) = (\mu' - \mu)D^{-1}$, где D^{-1} — обратная составная матрица изменений.

Рассмотрим модель действий группы изъятия при возникновении массовых беспорядков, вызванных межнациональным конфликтом (рис. 2) [4]. Группа изъятия может находиться в состоянии ожидания, готовности к выполнению поставленных задач, выполнения поставленных задач и т.п., что соответствует позициям сети Петри p_i. Текущее состояние группы изъятия моделируется помещением фишки в соответствующей позиции. Смена состояний может осуществляться только при наличии некоторых условий и моделируется с помощью переходов t_i.

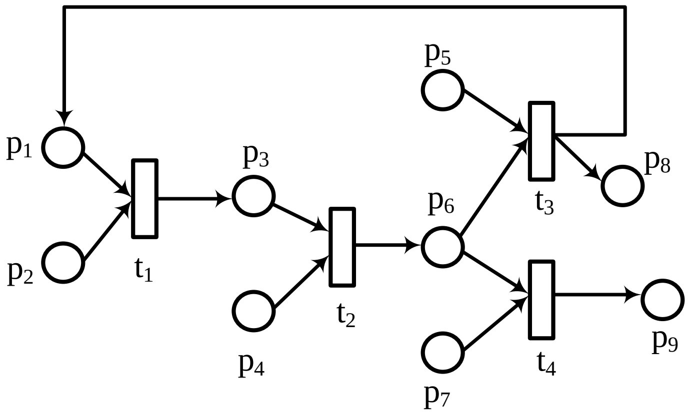


Рис. 2. Модель действия группы изъятия

Описание позиций и переходов приведено в таблице.

Описание элементов модели действий группы изъятия (ГИ)

№ п/п	Обозначение	Описание
1	p_1	ГИ ожидает постановку задачи.
2	p_2	Приказ о начале выполнения действий по изъятию.
3	p_3	ГИ производит изъятие активных участников беспорядков.
4	p_4	Доклад о выполнении задачи.
5	p_5	Поступила информация об эскалации беспорядков.
6	p_6	Ожидание приказа от руководителя оперативного штаба.
7	p_7	Приказ о завершении спецоперации.
8	p_8	Доклад о готовности к выполнению задач.
9	p_9	ГИ завершила работу.
10	$t_1 - t_4$	Переходы, описывающие процесс смены состояний.

Постановка задачи. В [5] описан алгоритм имитационного моделирования действий органов внутренних дел при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера, где в каждый момент времени может появиться не более одного события. Рассмотрим же пример, когда в сети Петри появляется два события и возникают конкурирующие переходы t_3 и t_4 (рис. 3). На рисунке видно, что фишки находятся в позициях $p_5, p_6,\ p_7$. Сработать могут оба перехода, а какой из них, не определено.

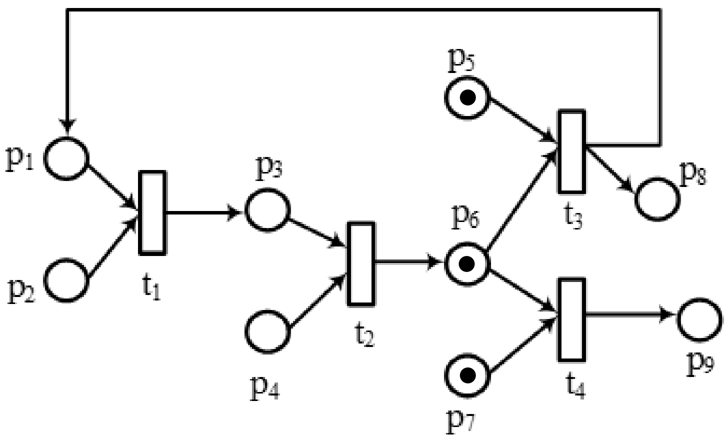


Рис. 3. Модель действия группы изъятия с конкурирующими переходами t_3 и t_4

Решение задачи. Для решения этой задачи введем функциональное дополнение сети Петри, устанавливающее порядок срабатывания конкурирующих переходов. Таким дополнением может являться определение приоритетов переходов, когда для части переходов сети устанавливается приоритет. Переход с наибольшим приоритетом будет срабатывать в первую очередь.

Дополнение, определяющее порядок срабатывания множества конкурирующих переходов при моделировании работы сети Петри.

Пусть условие срабатывания

$$\mu[i] \geq e[i] \cdot D^{-} \quad (5)$$

выполняется для нескольких переходов t_r и t_s с приоритетами pr_r и pr_s.

Тогда срабатывает переход, для которого приоритет максимален:

$$t_k = t_i \mid \max pr(T_\tau), \quad (6)$$

где $T_\tau = (t_r, t_s)$ — множество конкурирующих переходов t_r и t_s.

Алгоритм работы сети Петри для принятия решений ОВД при возникновении массовых беспорядков.

1. Составить формализованное описание сети Петри: $D^{-}[j, i]$; $D^{+}[j, i]$; $\mu[i]$; $\mu^{'}[i]$; D; pr_i, D^{-1}.

2. Решить уравнение (4) и найти вектор запусков переходов $f(\sigma) = e[j_1] + e[j_2] + \ldots + e[j_k]$ из равенства (3).

3. Проверить условие срабатывания (5) для каждого перехода.

4. Если в модели появляются два и более перехода для срабатывания, то следует применить правило (6).

5. Выбрать переход с максимальным приоритетом и найти новую маркировку сети Петри.

6. Проверить достижение конечной маркировки. Если маркировка достигнута, то на данном этапе алгоритм заканчивается. Если маркировка не достигнута, то переходим к шагу 3.

Применение модели сети Петри для принятия решений ОВД при возникновении массовых беспорядков.

Поместив фишку в позицию p_1 (рис. 4), получаем начальную маркировку $\mu = [p_1\, p_2\, p_3\, p_4\, p_5\, p_6\, p_7\, p_8\, p_9] = [1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$. Конечная (желаемая) маркировка будет соответствовать наличию фишки только в позиции p_9 $\mu' = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$. $pr\,(t_3) = 2, pr\,(t_4) = 1$.

$$D^{-} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$D^{+} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

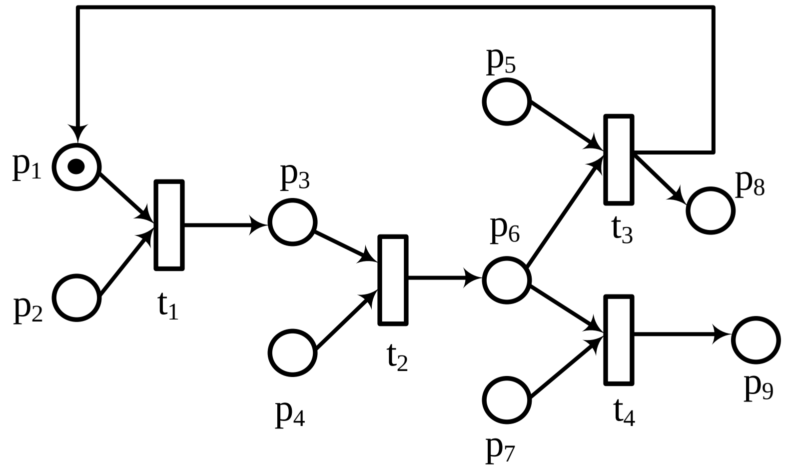


Рис. 4. Модель действия группы изъятия с начальной маркировкой

При нахождении матрицы, обратной составной матрицы изменений *(D)* выяснилось, что выражение обладает сингулярностью. Это означает, что обратной матрицы D^{-1} не существует. Однако в некоторых случаях можно использовать псевдообратную матрицу, которая определяется как такая матрица D^{+1}, что:

$$DD^{+1}D = D. \tag{7}$$

Псевдообратная матрица не является единственной, и ее вид зависит от способа построения. Например, для прямоугольной матрицы можно использовать метод Мура — Пенроуза [6]: если число столбцов меньше числа строк, то $D^{+1} = (D^TD)^{-1}D^T$; если наоборот, то выражение примет вид $D^+ = D^T(DD^T)^{-1}$. Таким образом:

$$D = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D^T = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$DD^T = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$(DD^T)^{-1} = \begin{pmatrix} 0.75 & 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0.125 & 0.375 & 0.25 & 0.375 \\ 0.375 & 0.125 & 0.75 & 0.125 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D^{+1} = D^T(DD^T)^{-1} = \begin{pmatrix} -0.375 & -0.125 & 0.25 & -0.125 \\ -0.75 & -0.25 & -0.5 & -0.25 \\ -0.125 & -0.375 & -0.25 & -0.375 \\ -0.125 & -0.375 & -0.25 & -0.375 \\ -0.375 & -0.125 & -0.75 & -0.125 \\ -0.25 & 0.25 & -0.5 & -0.75 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0.375 & 0.125 & 0.75 & 0.125 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Из (3), подставляя псевдообратную матрицу D^{+1} вместо обратной матрица D^{-1}, получим:

$$f(\sigma) = (0.375 \quad 0.125 \quad -0.25 \quad 1.125). \qquad (8)$$

Строим единичные вектора для каждого перехода:

$$f(\sigma) = e[j_1] + e[j_2] + \ldots + e[j_k] = \begin{pmatrix} 0.375 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0.125 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.25 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1.125 \end{pmatrix}.$$

Координаты полученного вектора переводим в целочисленные значения:

$$f(\sigma) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \qquad (9)$$

Проверяем условие срабатывания $\mu[i] \geq e[i] \cdot D^-$ для каждого перехода.

Выражение (9) показывает, что в модели действий группы изъятия сработают переходы t_1, t_2, t_4. Однако может возникнуть эскалация конфликта (рис. 3). При маркировке сети $\mu' = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0]$ возникает ситуация выбора перехода t_3 или t_4. Применим правило (6) :

$$T_\tau = (t_3\,, t_4),$$
$$t_k = t_3 \mid \max pr(t_3\,, t_4). \qquad (10)$$

Происходит срабатывание перехода t_3, и сеть Петри переходит в начальное состояние.

Выводы. Таким образом, разработанное дополнение сети Петри (5), (6) позволяет определить порядок срабатывания конкурирующих переходов, а алгоритм работы сети Петри для принятия решений ОВД при возникновении массовых беспорядков даст возможность ускорить процедуру выбора действий в оперативно меняющейся обстановке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пьянков О. В., Романов М. С. Оптимизация процессов принятия решений в ситуационных центрах органов внутренних дел // Вестник Воронежского института МВД России. — 2014. — № 1. — С. 120—129.

2. Меньших В. В., Горлов В. В. Оптимизация действий органов внутренних дел при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера // Информационная Безопасность Регионов : научно-практический журнал. — 2014. — № 3(16). — С. 81—87.

3. Пьянков О. В., Самороковский А. Ф. Алгоритм построения парето-оптимального множества на основе матричного представления сетей Петри // Вестник ВИ МВД России. — 2008. — №3. — С. 117—122.

4. Романов М. С. К вопросу об информационном обеспечении учебных ситуационных центров образовательных организаций МВД России // Вестник Воронежского института МВД России. — 2014. — № 4. — С. 253—259.

5. Меньших В. В., Горлов В. В. Алгоритм имитационного моделирования действий органов внутренних дел при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера // Вестник Воронежского института МВД России. — 2013. — № 3. — С. 54—58.

6. http://www.ams.org/bull/1920-26-09/S0002-9904-1920-03322-7/S0002-9904-1920-03322-7.pdf