

---



---

## МАКРОСЕТЬ НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННЫХ И ИНТЕРПРЕТИРОВАННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРАВИЛ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОНОМНОМ УПРАВЛЕНИИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

*Предлагается способ представления правил принятия решений бортовыми средствами автономного управления космическими аппаратами связи, ретрансляции и навигации. Модель автономного управления представлена в виде макросети, формируемой из специализированных схем переходов и интерпретаций позиций сетей Петри (Petri nets). Макросеть позволяет решать причинно-следственные связи процессов автономного управления в пространстве условий состояний бортовых систем и целей управления.*

Автономность современных космических аппаратов связи и навигации является важнейшим свойством, обеспечивающим высокую вероятность функционирования космических аппаратов (КА) в течение длительного срока активного существования при ограниченных затратах на привлечение наземного комплекса управления. Осуществляющие автономное управление бортовые средства принятия решений используют модель управления, которая должна обеспечивать процесс управления совокупностью большого количества функциональных элементов, характеризующихся многочисленными причинно-следственными связями между множеством параллельно протекающих асинхронных, но взаимосвязанных процессов. Для реализации этой модели целесообразно применение сетей Петри, которые являются мощным средством моделирования дискретных систем [1] и используются в самых различных областях техники [2...4; 6; 8], в том числе и при моделировании процессов управления и контроля космических аппаратов [5; 7].

В соответствии с [1; 3], сеть Петри задается совокупностью множеств  $N = (P, T, \alpha, \beta, \bar{M}_0)$ , где  $P$  – множество позиций,  $P \neq \emptyset$ ,  $|P| = m$ ;  $T$  – множество переходов,  $T \neq \emptyset$ ,  $|T| = n$ ,  $P \cap T = \emptyset$ ;  $\alpha$  – функция входных инцидентов;  $\beta$  – функция выходных инцидентов;  $\bar{M}_0$  – вектор начального маркирования.

Функции входных и выходных инцидентов задают отношения между позициями и переходами сети. При этом используются следующие обозначения:

- для  $t \in T$   $t = \{P \in P / \alpha(P, t) \neq 0\}$  и  $t = \{P \in P / \beta(P, t) \neq 0\}$ ;
- для  $P \in P$   $P = \{t \in T / \beta(P, t) \neq 0\}$  и  $P = \{t \in T / \alpha(P, t) \neq 0\}$ .

Множество  $t(t)$  называется множеством входных (выходных) позиций перехода  $t$ , а множество  $P(P)$  – множеством входных (выходных) переходов позиции  $P$ . Вектор  $\bar{M}_0$  ставит в соответствие каждой позиции сети целое неотрицательное число.

Графически сеть Петри представляет собой ориентированный двудольный граф с двумя типами вершины: позиций и переходов. В содержательном плане позициям соответствуют некоторые условия, а переходам – события. Входные позиции перехода определяют набор условий, необходимых для того, чтобы событие могло произойти. В свою очередь, в результате события появляются новые условия, определяемые выходными позициями перехода. Таким образом, сеть Петри позволяет отсле-

живать причинно-следственные связи моделируемого процесса управления в пространстве условий и событий.

Для решения поставленных задач широкое применение нашла такая разновидность сетей Петри, как  $E$ -сети.  $E$ -сеть определяется в работе [3] как связанная конфигурация позиций посредством разрешаемых схемами переходов и задается совокупностью множеств  $E = (L, P, R, A, \bar{M}_0)$ , где  $L$  – конечное непустое множество позиций;  $P$  – множество периферийных позиций;  $R$  – множество решающих позиций;  $A$  – конечное непустое множество переходов  $\{a_i\}$ ,  $a_i = \{S, t(a_i), q\}$ , здесь  $S$  – схема перехода,  $t(a_i)$  – время перехода,  $q$  – процедура перехода;  $\bar{M}_0$  – начальное маркирование.

Еще большими возможностями обладают макро- $E$ -сети, построенные на более сложных элементах с формальным определением в терминах  $E$ -сетей.

Но анализ известных интерпретаций сетей Петри показал, что они не обеспечивают универсальности и наглядности описания элементов, образующих модель управления. Поэтому для представления процессов управления космическими аппаратами ретрансляции и связи необходимо расширить и интерпретировать понятия сетей Петри, т. е. ввести специализированные схемы переходов и интерпретации позиций, определив таким образом конкретное понятие макросети описания модели автономного управления.

При определении понятия макросети необходимо, чтобы представленная ею модель управления обеспечивала однозначное описание параллельных процессов управления. Процесс управления состоит в пошаговом движении изображающей точки, характеризующей состояние объекта управления, в заданную область. При этом состояние объекта в каждый момент времени характеризуется точкой в фазовом пространстве  $x_n$ , а положение управляющих функций – точкой  $U = (U_1, \dots, U_r)$  в пространстве управлений  $U$  размерности  $r$ . Технические ограничения приводят к выделению в пространстве управлений  $U$  области допустимых управлений  $U_d$ .

В фазовом пространстве координат  $x_n$  для каждой точки  $x_i$  можно выделить систему  $B_i(E)$  областей  $E$ , из которых возможен переход в точку  $x_i$  при  $U \in U_d$ . Для реальных объектов необходимо говорить не о конечной точке  $x_i$ , а о конечной области  $Q_i$ . Задача управления состоит в том, чтобы в заданный момент времени  $t$  сформировать такое  $U \in U_d$ , которое обеспечит переход изображающей точки в конечную область  $Q_i$  при условии, что начальное положение  $x_0 \in B_i(E)$ .

Количество областей  $Q$  существенно меньше количества областей  $E$ , поэтому для каждого задаваемого состояния целесообразно определить все возможные переходы из  $E \in B_i(E)$ .

Заданное состояние определяет номер первого шага  $N_i$ . Из-за взаимнооднозначного соответствия  $Q_i$  и  $N_i$  задание  $Q_i$  может быть сведено к заданию  $N_i$ . Шаг включает определение принадлежности текущего состояния объекта управления  $x(t)$  области  $E_k \in B_i(E)$ . Управляющее воздействие на объект управления формируется как функция от  $E_k$  и определяет следующий шаг, также соответствующий  $E_k$ .

Физические характеристики объекта управления приводят к необходимости временных задержек между шагами. Величина задержки также является функцией от  $E$ . Определение принадлежности  $x(t)$  области  $E$  в соответствии с теоремой об изоморфности булевой алгебры множеств булевой алгебре функций можно представить в виде вычислений логической формулы, элементами которой являются одноместные двужначные предикаты нахождения параметров в определенных состояниях и операции дизъюнкции, конъюнкции и отрицания, создающие функционально полную систему.

Кроме параметров, характеризующих состояние объекта управления, необходимо учитывать состояние взаимовлияющих процессов управления, для чего необходимы специальные внутренние параметры, состояние которых изменяется по мере выполнения соответствующих процессов управления.

Контроль протекания процессов управления внешним контуром управления проводится по выходным параметрам, формирование которых также осуществляется при реализации процессов управления.

С учетом вышеизложенного автором введена следующая интерпретация позиций:

$$P = P_{и.п} \cup P_{у.п} \cup P_{у.в} \cup P_{в.п},$$

где  $P_{и.п}$  – множество позиций типа «инициализация процесса»;  $P_{у.п}$  – множество позиций типа «управление переходом», соответствующих решающей позиции  $E$ -сетей;  $P_{у.в}$  – множество позиций типа «управляющее воздействие», обозначающих связи процесса с исполнительными органами;  $P_{в.п}$  – множество позиций типа «выходной параметр», обозначающих информационную связь с внешним контуром управления.

Также были определены переходы  $T$  следующих типов:  $T_{в.п}$  – временной переход;  $T_{о.п}$  – организация процесса;  $T_{п.р}$  – предикатный переход;  $T_{у.п}$  – управляемый переход:

$$T = T_{в.п} \cup T_{о.п} \cup T_{п.р} \cup T_{у.п}.$$

Множество временных переходов  $T_{в.п}$  (рис. 1) предназначено для обеспечения описания временных задержек, отображающих характеристики реальных процессов управления:  $T_{в.п} \in T$ . Для  $t_i \in T_{в.п}$   $|t| = 1$ ,  $|t| \geq 1$ ,  $\alpha(t, t_i) = 1$ ,  $\beta(t_i, t) = 1$   $|t| \in P_{и.п}$ ,  $|t| \in P_{у.в} \cup P_{у.п} \cup P_{и.п} \cup P_{в.п}$ . Срабатывание перехода безусловное, через интервал времени  $\tau$  от момента возбуждения:

$$\forall P \in P \{M(P) - \alpha(\beta, t_i) \wedge (\tau_R = \tau_i)\},$$

где  $\tau_R$  – время, прошедшее с момента возбуждения перехода.

Множество переходов «организация процессов»  $T_{о.п}$  предназначено для обеспечения возможности распараллеливания процессов. Для  $T_i \in T_{о.п}$   $|t| = 1$ ,  $|t| \geq 1$ ,  $\alpha(t, t_i) = 1$ ,  $\beta(t_i, t) = 1$   $|t| \in P_{и.п}$ ,  $|t| \in P_{и.п}$ . Срабатывание безусловное:  $\forall P \in P \{M(P) - \alpha(P, t_i) \geq 0\}$ . Время от момента возбуждения перехода до срабатывания  $\tau_{о.п}$ .

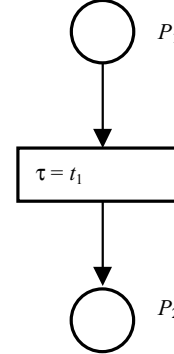


Рис. 1. Переход  $T_{в.п}$

Эквивалентом перехода типа «организация процессов»  $T_{о.п}$  является фрагмент базовой сети Петри с двумя переходами  $t_1$  и  $t_2$ , где  $t_1$  – временной переход с  $\tau = \tau_{о.п}$ ;  $t_2$  – переход с мгновенным срабатыванием (рис. 2).

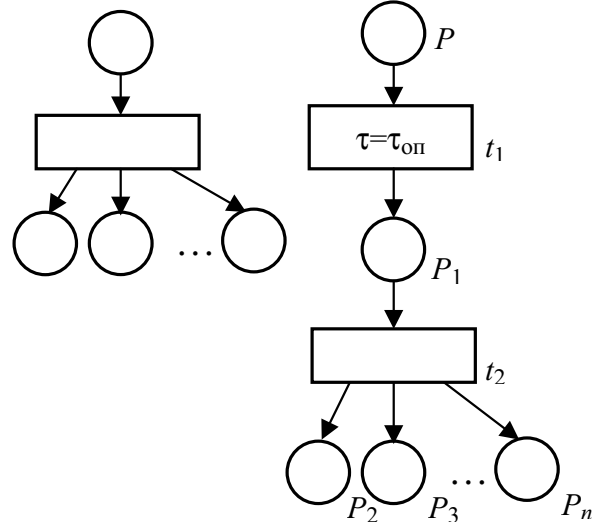


Рис. 2. Переход  $T_{о.п}$  и эквивалентный ему фрагмент сети Петри

Входные и выходные функции инцидентий для перехода  $T_{о.п}$  следующие:

$$\begin{aligned} \alpha(t_1, t_1) &= 1, \\ \beta(t_1, P_1) &= 1, \\ \alpha(P_1, t_2) &= 1, \\ \beta(t_2, P_2) &= 1, \\ \beta(t_2, P_3) &= 1, \\ &\dots \\ \beta(t_2, P_n) &= 1. \end{aligned}$$

$$\tau_{о.п} = \tau(\bar{M} = \{1, 0, 0, \dots, 0\} \rightarrow \bar{M} = \{0, 0, 1, \dots, 1\}).$$

Множество переходов типа «предикатный переход» –  $T_{п.р}$  предназначено для обеспечения принятия решений на выдачу управляющего воздействия и инициализацию сле-

дующего шага. Для  $T_i \in T_{\text{пр}} \mid |t| = 1, |t| \geq 1, \alpha(t_i, t_i) = 1, \beta(t_i, t_i) = 1, |t| \in P_{\text{и.п}}, |t| \in P_{\text{и.п}} \cup P_{\text{у.в}} \cup P_{\text{у.п}} \cup P_{\text{в.п}}$ .

Переходу  $t_i$  соответствует предикат  $P_r(t_i)$ .

Нормальное срабатывание перехода происходит при  $P_r(t_i) = \text{true}$  с интервалом времени от момента возбуждения до момента срабатывания  $t_{\text{ср}}$ .  $P_r(t)$  в общем случае является составным предикатом:  $P_r(t) = \bigwedge_{i=1}^m (\bigwedge_{j=1}^{n_i} P_{r_j})$ , где  $P_{r_j}$  – элементарный предикат, представляющий собой высказывание о нахождении отдельного параметра КА в конкретном состоянии.

При  $P_r(t_i) = \text{false}$  происходит срабатывание перехода типа «сброс» через интервал времени  $\tau_{\text{сбр}}$ , при этом маркеры во входные позиции не переходят.

Эквивалентом перехода предикатного типа является фрагмент базовой сети Петри с тремя переходами  $t_1, t_2, t_3$ , где  $t_1$  – временной переход с  $\tau = \tau_{\text{ср}}$ ;  $t_2$  – предикатный переход с мгновенным срабатыванием;  $t_3$  – временной переход с  $\tau = \tau_{\text{сбр}}$  (рис. 3).

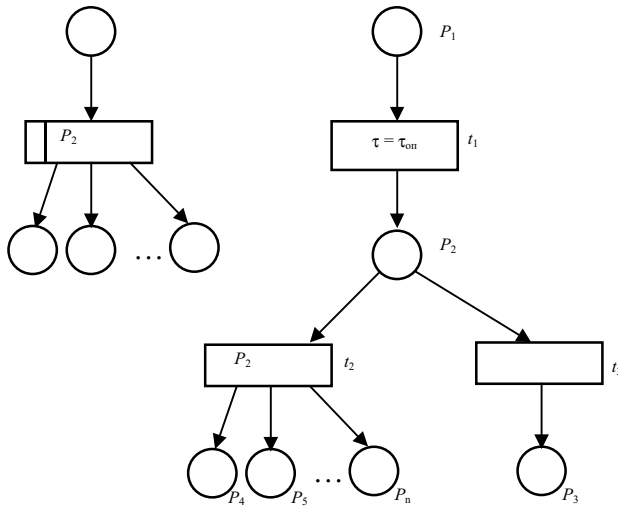


Рис. 3. Предикатный переход  $T_{\text{пр}}$  и эквивалентный ему фрагмент сети Петри

Входные и выходные функции инцидентий перехода  $T_{\text{пр}}$  следующие:

$$\begin{aligned} \alpha(P_1, t_1) &= 1, \\ \beta(t_1, P_2) &= 1, \\ \alpha(P_2, t_2) &= 1, \\ \alpha(P_2, t_3) &= 1, \\ \beta(t_3, P_3) &= 1, \\ \beta(t_2, P_4) &= 1, \\ \beta(t_2, P_5) &= 1, \\ &\dots \\ \beta(t_2, P_n) &= 1. \end{aligned}$$

$$\tau_{\text{ср}} = \tau(\bar{M} = \{1, 0, k, 0, \dots, 0\} \rightarrow \bar{M} = \{0, 0, k, 1, \dots, 1\}),$$

$$\tau_{\text{сбр}} = \tau(\bar{M} = \{1, 0, k, 0, \dots, 0\} \rightarrow \bar{M} = \{0, 0, k+1, 0, \dots, 0\}),$$

где  $k \rightarrow \infty$ .

Множество управляемых переходов  $T_{\text{уп}}$  предназначено для обеспечения возможности моделирования взаимодействия асинхронных параллельных процессов. Управ-

ляемый переход имеет три входа  $a, b, c$ , где  $a$  – прямой вход;  $b$  – обратный вход,  $c$  – иницирующий вход. Управляемые переходы являются переходами предикатного типа, а состояние предиката определяется фактом поступления маркера на прямой или обратный входы определения предиката. Состояние сохраняется до прихода маркера на противоположный вход определения предиката. Возбужденным переходом является с момента появления маркера на иницирующем входе:  $T_{\text{уп}} \in T$ . Для  $t_1 \in T_{\text{уп}}$ ,  $|t| = 3, |t| \geq 1, t_a \in P_{\text{у.п}}, t_b \in P_{\text{у.п}}, t_c \in P_{\text{и.п}}, t_a \cup t_b \cup t_c = t$ , где  $t_a$  – прямой вход;  $t_b$  – обратный вход;  $t_c$  – иницирующий вход,  $t \in P_{\text{у.в}} \cup P_{\text{у.п}} \cup P_{\text{в.п}}$ .

Нормальное срабатывание перехода происходит при поступлении маркера на вход  $t_c$  и при  $P_r(t_i) = \text{true}$ , т. е. если последний маркер (для входов  $t_a$  и  $t_b$ ) поступил на вход  $t_a$ . Срабатывание происходит через интервал времени  $\tau_{\text{ср}}$ .

При  $P_r(t_i) = \text{false}$ , т. е. если последний маркер поступил на вход  $t_b$ , происходит срабатывание перехода типа «сброс» через интервал времени  $\tau_{\text{сбр}}$ . При этом маркеры в выходные позиции не переходят.

Эквивалентом управляемого перехода является фрагмент базовой сети Петри, состоящий из 8 переходов, где  $t_1, t_2, t_5, t_6$  и  $t_8$  – переходы с мгновенным срабатыванием,  $t_3, t_4, t_7$  – временные переходы с задержками срабатывания соответственно  $\tau_{\text{обр}}, \tau_{\text{сбр}}, \tau'_{\text{сбр}}$ , где  $\tau_{\text{сбр}} = \tau'_{\text{сбр}} + \tau_{\text{обр}}$  (рис. 4).

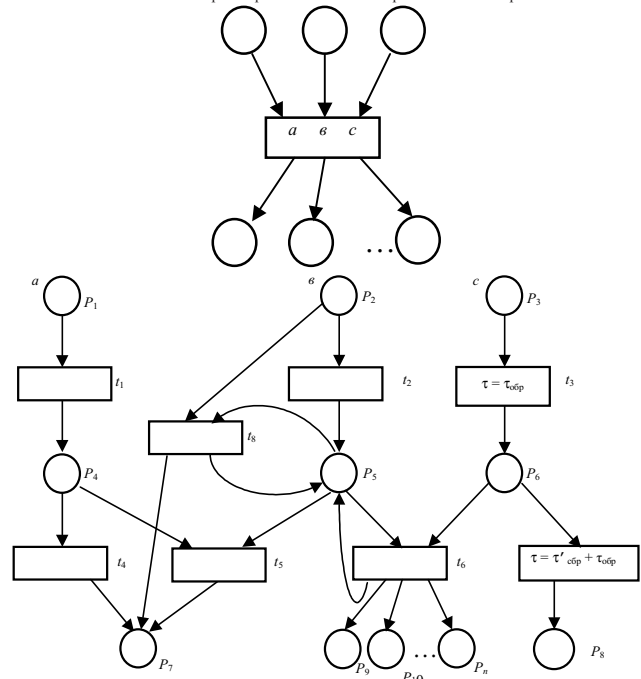


Рис. 4. Управляемый переход и эквивалентный ему фрагмент сети Петри

Входные и выходные функции инцидентий  $T_{\text{уп}}$  следующие:

$$\begin{aligned} \alpha(P_1, t_1) &= 1, \\ \alpha(P_2, t_2) &= 1, \\ \alpha(P_3, t_3) &= 1, \\ \beta(t_1, P_4) &= 1, \\ \beta(t_2, P_5) &= 1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \beta(t_3, P_6) &= 1, \\
 \alpha(P_4, t_4) &= 1, \\
 \alpha(P_4, t_5) &= 1, \\
 \alpha(P_5, t_5) &= 1, \\
 \alpha(P_5, t_6) &= 1, \\
 \alpha(P_6, t_6) &= 1, \\
 \alpha(P_6, t_7) &= 1, \\
 \beta(t_4, P_7) &= 1, \\
 \beta(t_5, P_7) &= 1, \\
 \beta(t_6, P_5) &= 1, \\
 \beta(t_7, P_8) &= 1, \\
 \beta(t_6, P_9) &= 1, \\
 \beta(t_6, P_{10}) &= 1, \\
 &\dots \\
 \beta(t_6, P_n) &= 1, \\
 \alpha(P_2, t_8) &= 1, \\
 \beta(t_8, P_7) &= 1, \\
 \beta(t_8, P_5) &= 1, \\
 \alpha(P_5, t_8) &= 1.
 \end{aligned}$$

Процесс изменения состояния при переходе «true–false» следующий:

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_0 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_1 &= \{0, 1, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_2 &= \{0, 0, 0, 0, 1, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\},
 \end{aligned}$$

а процесс изменения состояния при переходе «false–true» имеет вид

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_0 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 1, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_1 &= \{1, 0, 0, 0, 0, 1, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_2 &= \{0, 0, 0, 1, 1, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_3 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k+1, m, 0, 0, \dots, 0\}.
 \end{aligned}$$

Процесс подтверждения состояния «true» можно представить в виде

$$\bar{M}_2 = \{0, 0, 0, 0, 1, 0, k+1, m, 0, 0, \dots, 0\},$$

а процесс подтверждения состояния «false» – в виде

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_0 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_1 &= \{1, 0, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_2 &= \{0, 0, 0, 1, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_3 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k+1, m, 0, 0, \dots, 0\}, \tau(\bar{M}_0 \rightarrow \bar{M}_3) = \tau_{сбр}.
 \end{aligned}$$

Процесс срабатывания перехода при состоянии «true» описывается как

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_0 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_1 &= \{0, 0, 1, 0, 1, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_2 &= \{0, 0, 0, 0, 1, 1, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \tau(\bar{M}_1 \rightarrow \bar{M}_2) = \tau_{сбр}, \\
 \bar{M}_3 &= \{0, 0, 0, 0, 1, 0, k, m, 1, 1, \dots, 1\},
 \end{aligned}$$

а процесс срабатывания перехода при состоянии «false» – как

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_0 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_1 &= \{0, 0, 1, 0, 1, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\},
 \end{aligned}$$

$$\bar{M}_2 = \{0, 0, 0, 0, 1, 1, k, m, 0, 0, \dots, 0\},$$

$$\bar{M}_3 = \{0, 0, 0, 0, 1, 0, k+1, m, 1, 1, \dots, 1\},$$

$$\tau(\bar{M}_1 \rightarrow \bar{M}_3) = \tau_{сбр} + \tau'_{сбр} = \tau_{сбр}.$$

Введенные интерпретации позиций и определения переходов позволяют представить модель управления космическими аппаратами ретрансляции и связи в виде макросети с ограниченным числом типов элементов. В общем случае модель определяется следующим выражением:

$$N = (P_{у.в}, P_{и.п}, P_{у.п}, P_{в.п}, T_{вр}, T_{о.п}, T_{пр}, T_{у.п},$$

$$\alpha_{вр}, \alpha_{о.п}, \alpha_{пр}, \alpha_{у.п}, \beta_{вр}, \beta_{о.п}, \beta_{пр}, \beta_{у.п}, \bar{M}_0),$$

$$\text{где } |P_{у.в}| \cup |P_{и.п}| \cup |P_{у.п}| \cup |P_{в.п}| \neq 0;$$

$$|T_{вр}| \cup |T_{о.п}| \cup |T_{пр}| \cup |T_{у.п}| \neq 0, |P_{и.п}| \neq 0;$$

$$|T_{пр}| \cup |T_{у.п}| \neq 0; |\alpha_{вр}| : P_{и.п} \times T_{вр},$$

$$\beta_{ср} : (P_{у.в} \cup P_{у.п} \cup P_{и.п} \cup P_{в.п}) \times T_{вр}; \alpha_{о.п} : P_{и.п} \times T_{о.п};$$

$$\beta_{о.п} : P_{и.п} \times T_{о.п}; \alpha_{пр} : P_{и.п} \times T_{пр};$$

$$\beta_{пр} : (P_{и.п} \cup P_{у.в} \cup P_{и.п} \cup P_{в.п}) \times T_{пр}; \alpha_{у.п} : P_{и.п} \times T_{у.п};$$

$$\beta_{у.п} : (P_{у.в} \cup P_{у.п} \cup P_{и.п} \cup P_{в.п}) \times T_{у.п}.$$

Анализ основных свойств расширенных сетей Петри затруднен [2] и возможен только в случае их сведения к обычным сетям Петри. Рациональным является сведение к наиболее изученным подклассам, из которых представляют интерес *FC*-сети (Free Choice) – сети свободного выбора. Каждая дуга, исходящая из позиции, является единственным выходом из нее либо единственным входом в переход. Иными словами, если переход имеет общую входную позицию с другим переходом, то эта входная позиция единственная:

$$\forall P \forall t(P, t) \Rightarrow [P = \{t\} \vee t = \{P\}].$$

Макросеть может быть представлена в виде совокупности эквивалентных фрагментов, объединенных операциями наложения. Эта операция – обычное теоретическое множественное объединение графов, дополненное правилом формирования разметки.

Если  $N_1 = (P_1, T_1, \alpha_1, \beta_1, M_{0_1})$

и  $N_2 = (P_2, T_2, \alpha_2, \beta_2, M_{0_2})$ , то

$$N = (N_1, N_2) = (P_1 \cup P_2, T_1 \cup T_2, \alpha_1 \cup \alpha_2, \beta_1 \cup \beta_2, M_0),$$

где

$$M_0(P) = \begin{cases} M_{0_i}(P), & \text{если } P \in P_i, \text{ где } i=1, 2 \text{ и } P \in P_1 \cap P_2, \\ \min(M_{0_1}(P), M_{0_2}(P)), & \text{если } P \in P_1 \cap P_2. \end{cases}$$

Для переходов типа «временной переход», «организация процессов», «предикатный переход» эквивалентные фрагменты базовой сети Петри относятся к классу *FC*-сетей. Поэтому доказательство принадлежности макросетей к *FC*-сетям сводится к преобразованию перехода типа «управляемый переход» в *FC*-сеть. Фрагмент, эквивалентный элементу типа «управляемый переход», по конфигурации удовлетворяющий требованиям *FC*-сетей, приведен на рис. 5.

Относительно начального представления фрагмента добавились переходы  $t'_1, t'_2, t'_3, t'_4, t'_5, t'_6$  и позиции  $P', P'_2, P'_3, P'_4, P'_5, P'_6$ . Все переходы являются переходами безусловного мгновенного срабатывания, а все позиции – иницирующими.

Таким образом, представленный выше метод представления посредством специально определенной макросети модели управления, лежащей в основе бортовой

системы принятия решений, обеспечивает возможность однозначного описания и анализа параллельных, асинхронных и взаимосвязанных процессов управления.

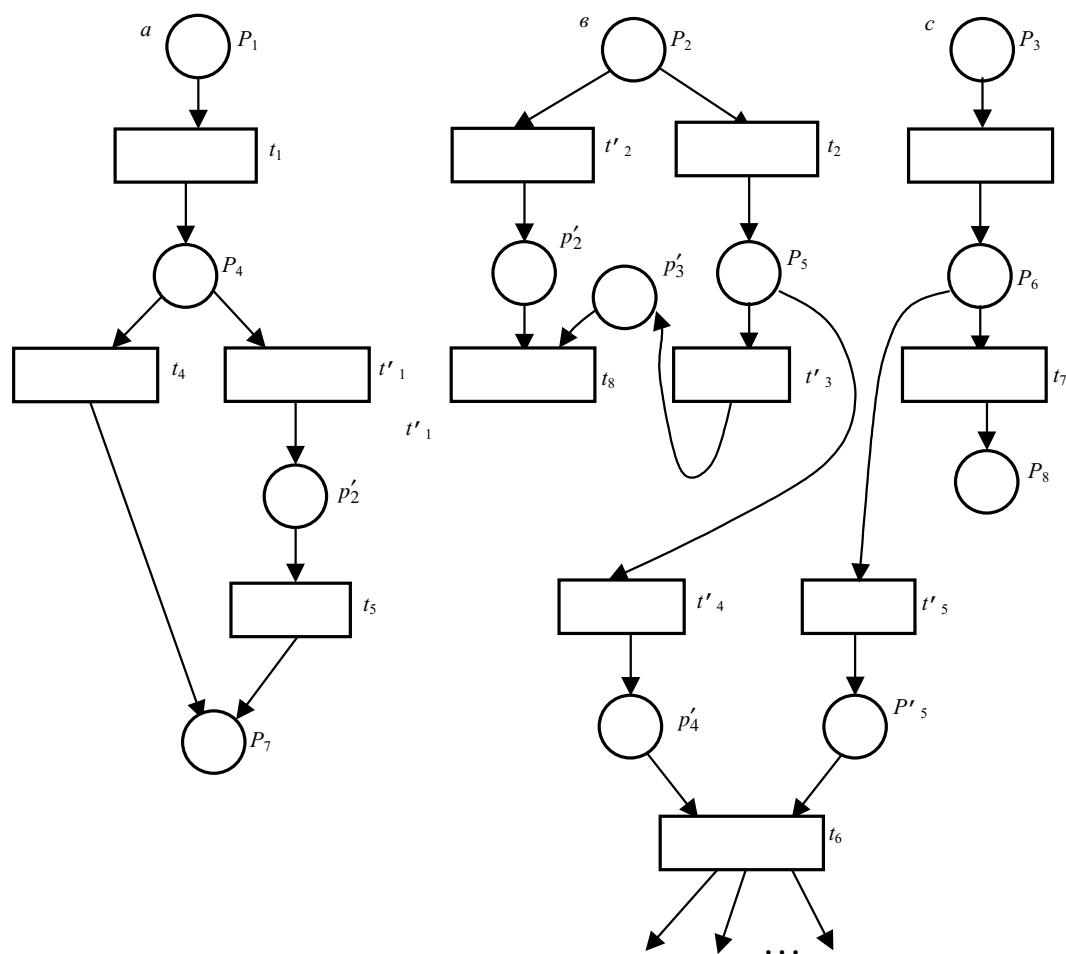


Рис. 5. Фрагмент FC-сети, эквивалентный управляемому переходу

#### Библиографический список

1. Никонов, В. В. Применение сетей Петри / В. В. Никонов, Ю. Е. Подчурский // Зарубежная радиоэлектроника. 1986. № 11.
2. Никонов, В. В. Сети Петри, теория, применение / В. В. Никонов, Ю. Е. Подчурский // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 4.
3. Бандман, О. Л. Методы параллельного микропрограммирования / О. Л. Бандман. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1981.
4. Котов, В. Е. Алгебра регулярных сетей Петри / В. Е. Котов ; ВЦ Сиб. отд-ния АН СССР. Новосибирск, 1978. № 98.
5. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко [и др.]. М. : Сов. радио, 1973.
6. Дмитриев, А. К. Основы теории построения и контроля сложных систем / А. К. Дмитриев, П. А. Мальцев. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988.
7. Leiden Stevan, H. Building of expert systems using Petri nets as a representation of knowledge flow / H. Leiden Stevan // 6 th Annu. Int. Phoenix Conf. Comput. and Commun., 25–27 febr. 1987, Washington. Washington, 1987. P. 561–565.
8. Юдицкий, С. А. Сети Петри – формальный аппарат моделирования динамики сложных систем / С. А. Юдицкий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 8.

V. V. Khartov

### THE MACRONET ON THE BASES OF ENLARGED AND INTERPRETED PETRI NETS TO PROVIDE CANONS OF ARRIVAL AT A DECISION WHEN BACKUP CONTROL BY SPACECRAFTS

The method proposed serves the representation of the regulations of decision-making by on-board off-line control means of the spacecrafts of communication, retransmission, and navigation. The off-line control model is presented in the form of the macro-net which is made of the specific in operation specialized transition circuits and the versions of Petri nets positions. The macro-net allows solving the cause-and-effect relations of the off-line control processes in the area of conditions of the on-board systems states and the control purposes.