Модель функционирования подсистемы управления сетевым резервированием транспортной составляющей телекоммуникационной системы в терминах сетей Петри

Functional model of transport constituent network redundancy control subsystem of telecommunication system in terms of Petri nets

Ефимов / Efimov V.
Вячеслав Викторович
(vve@loniis.ru)
кандидат технических наук, доцент.
Филиал ФГУП «Ленинградское отделение центрального научно-исследовательского института связи» (ЛО ЦНИИС),
и. о. директора.
г. Санкт-Петербург

Лыжинкин / Lyzhinkin K.
Константин Владимирович
(lkv@loniis.ru)
Филиал ФГУП ЛО ЦНИИС,
начальник научно-технического центра.
г. Санкт-Петербург

Зюзин / Zyuzin A.
Александр Николаевич
(alexz01@bk.ru)
кандидат технических наук.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» (ВАС им. С. М. Буденого) МО РФ,
преподаватель.
г. Санкт-Петербург

Марченко / Marchenko D.
Дмитрий Валентинович
(marchello2000@mail.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВАС им. С. М. Буденного,
заместитель начальника кафедры.
г. Санкт-Петербург

Ясинский / Yasinsky S.
Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
Филиал ФГУП ЛО ЦНИИС,
научный консультант.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: телекоммуникационная система – telecommunication system; транспортная сеть – transport network; подсистема управления сетевым резервом – network redundancy control subsystem; сети Петри – Petri net.

В работе предлагается использовать сети Петри для моделирования подсистемы управления сетевым резервированием транспортной составляющей телекоммуникационной системы, что позволяет учитывать время перехода на резерв, время его освобождения, а также условия конечного объема сетевого резерва.

The paper proposes to use Petri nets to simulate transport constituent network redundancy control subsystem of telecommunication system which allows considering fallback transfer time, its release time, and condition of network redundancy end volume.

На протяжении последних двух десятков лет объемы передаваемого трафика в телекоммуникационных системах (ТКС) продолжают активно расти. Технологии «транспортирования» трафика постоянно совершенствуются, расширяя возможности современных транспортных составляющих ТКС. При этом неуклонно увеличивается «цена» аварии на современной транспортной сети ТКС. Следовательно, вопросу создания качественной системы контроля и управления (*Operations, administration and management – OAM*) современной транспортной сетью ТКС и входящей в ее состав подсистемы резервирования уделяется особое внимание.

Создание подсистемы резервирования транспортной составляющей ТКС неизбежно связано с дополнительными затратами. Наибольшие затраты вызывает подсистема сетевого резервирования, поскольку именно сетевой резерв составляет до половины потенциальной пропускной способности сети и используется только в случае повреждений. Проблема выбора

рационального варианта сетевого резервирования и отработка возможных сценариев его использования для современных транспортных сетей ТКС является актуальной темой исследования.

Поиском оптимальных решений этой проблемы занимаются многие специалисты (например, операторы связи и поставщики оборудования для построения сетей связи). В настоящее время наряду с широко известными вариантами сетевого резервирования транспортных сетей ТКС (1+1, *SNCP*, *MS SPRing*) находят свое применение и другие варианты (*p-cycle*, многоконтурные структуры).

Система резервирования транспортных сетей ТКС помимо необходимого объема резервного сетевого и узлового ресурсов включает также логическую взаимосвязь этих элементов, регулируемую программной составляющей системы резервирования, представляемой в виде подсистемы управления.

Исследования условий и особенностей функционирования подсистемы управления сетевым резервированием транспортной составляющей ТКС требуют адекватного математического моделирования с учетом условий конечного объема сетевого резерва и времени переключении. Как показывает опыт исследования автоматизированных систем управления различного назначения, сети Петри являются наиболее удобным инструментом математического моделирования недетерминированных и конфликтных процессов функционирования сложных технических и программных структур и систем [1, 2, 3].

Сеть Петри – это математическая модель для представления структуры и анализа динамики функционирования систем в терминах «условие» и «событие». Сеть Петри характеризуется следующими множествами [1]:

$$C = (P, T, \hat{I}, \hat{O}, \overrightarrow{\mu_0}), \qquad (1)$$

где: $P = \{p_1, p_2, ..., p_n\}$ – конечное множество позиций (состояний); $T = \{t_1, t_2, ..., t_m\}$ – конечное множество временных переходов; $\hat{I} : T \times P \to N_0$ – входная функция временных переходов; $\hat{O} : T \times P \to N_0$ – выходная функция временных переходов; $\overrightarrow{\mu_0} = (\mu_0^1, ..., \mu_0^n)^T$ – вектор начальной (исходной) маркировки.

Для описания логики работы подсистемы управления системы резервирования транспортной сети ТКС с использованием математического аппарата на основе сетей Петри сначала необходимо определить множество позиций и переходов. Под множеством состояний будем понимать состояния линий передачи и состояния транспортной сети ТКС в целом. Под множеством переходов будем понимать переключения, которые производятся на сетевых узлах транспортной сети ТКС. Опишем множество позиций, характеризующих состояние линий передачи в виде входных позиций $P^t = \{p_1^t, p_2^t, ..., p_n^t\}$. Под позициями понимаются состояния, характеризующие аварии на линиях передачи ($1, 2, ..., n$). Множество входных позиций $P^r = \{p_1^r, p_2^r, ..., p_n^r\}$ будем описывать позициями, соответствующими событиям восстановления на линиях передачи. Множеством позиций $P^s = \{p_1^s, p_2^s, ..., p_n^s\}$ опишем состояние транспортной сети – «режим нормальная работа». Множеством позиций $P^w = \{p_1^w, p_2^w, ..., p_n^w\}$ будем называть позиции указателей, которые показывают на существующую аварию конкретного участка транспортной сети – «режим авария на линии». Множеством позиций $P^w = \{p_1^w, p_2^w, ..., p_n^w\}$ будем называть позиции указателей, которые показывают на существующую аварию всей сети – «режим авария на сети». Множество позиций, характеризующих процессы, происходящие на сети, опишем следующим образом: множество позиций $P^a = \{p_1^a, p_2^a, ..., p_n^a\}$ – команды аварии – «переход на резерв», которые подаются на каждый участок линии передачи для переключения на резерв, множество позиций $P^{tc} = \{p_1^{tc}, p_2^{tc}, ..., p_n^{tc}\}$ – команды «восстановления резерва», которые подаются на каждый сетевой узел для вывода сетевого резерва в «режим нормальная работа». Множество позиций $P^{rf} = \{p_1^{rf}, p_2^{rf}, ..., p_n^{rf}\}$ указывает на событие восстановления отказавшей линии передачи и необходимости перевода сетевого резерва линий передачи в «режим освобождения резерва» транспортной сети. Множество позиций $P^{tf} = \{p_1^{tf}, p_2^{tf}, ..., p_n^{tf}\}$ указывает на аварии линии передачи и необходимости перевода сетевого резерва линий передачи в «режим занятия резерва». В результате такого моделирования исключается повторное обращение к сетевому резерву в случае второй аварии на сети связи.

Опишем множество переходов, которые характеризуют переключения, производимые на сетевом узле транспортной составляющей ТКС. Множество переключений $T^{tf} = \{t_1^{tf}, t_2^{tf}, ..., t_m^{tf}\}$ будет соответствовать переходу подсистемы резервирования в «режим авария на линии» на участке $1, 2, ..., n$ и подачи команды «переход на резерв» для остальных узлов транспортной сети ТКС. Множество переключений $T^{tc} = \{t_1^{tc}, t_2^{tc}, ..., t_m^{tc}\}$ будет определять множество переходов подсистемы резервирования в «режим авария на сети» и подачи команды «переход на резерв» для остальных узлов. Множество переключений $T^{rc} = \{t_1^{rc}, t_2^{rc}, ..., t_m^{rc}\}$ будет описывать события переходов системы резервирования из «режима авария на сети» в режим «восстановления резерва» и подачи команд «восстановления резерва» для всех узлов транспортной сети ТКС. Множество переключений $T^{rf} = \{t_1^{rf}, t_2^{rf}, ..., t_m^{rf}\}$ будет представлять переходы из «режима авария на линии» в «режим освобождение резерва». Множество переключений $T^w = \{t_1^w, t_2^w, ..., t_m^w\}$ будет означать переходы из состояния «режим занятия резерва» в «режим авария на линии передачи». Множество переключений $T^r = \{t_1^r, t_2^r, ..., t_m^r\}$ будет определять переходы из состояния «режим освобождения резерва» в «режим нормальная работа». Входные и выходные функции переходов $\hat{I} : T \times P \to N_0$, $\hat{O} : T \times P \to N_0$ будут соответствовать взаимосвязям между элементами сети Петри (позиций и переходов). Вектор начальной

маркировки (графически – наличие маркеров-точек на множестве позиций) будет определять состояние подсистемы управления сетевым резервированием транспортной сети ТКС на момент начала моделирования. Маркер-точка в позиции будет означать активацию режима или подачи команды соответствующей позиции.

В качестве примера рассмотрим работу графической модели функционирования подсистемы управления сетевым резервированием для отдельно взятого узла транспортной составляющей ТКС с одной входящей линией и одной исходящей линией (рисунок 1). При этом логика работы подсистемы управления сетевым резервированием будет соответствовать режиму 1:1, то есть когда имеется сетевой резерв, который соответствует передаваемым объемам информации и используется только в случае аварии.

Начальная маркировка позиции p_1^s соответствует готовности системы резервирования и работе в «режиме нормальная работа». Установка маркера в позицию p_1^t указывает на аварию участка сети входящей линии. Установка маркера в позицию p_1^r соответствует восстановлению связи на участке сети входящей линии. Динамика работы механизма резервирования будет соответствовать перемещению маркеров по позициям и достижения конечного состояния, при котором дальнейшее его движение невозможно – это состояние называется «финальной маркировкой». Последовательное соединение всех моделей узлов связи позволяет получить модель функционирования подсистемы управления сетевым резервированием транспортной составляющей ТКС в целом.

Так, функциональная модель подсистемы управления сетевым резервированием типа SNCP для транспортной составляющей ТКС с четырьмя узлами связи, изображенной на рисунке 2, в предложенных терминах сетей Петри будет иметь вид, представленный на рисунке 3.

Проанализируем возможные начальные маркировки для представленной на рисунке 3 модели транспортной сети ТКС с четырьмя узлами связи, но с учетом резервирования:

$$\overrightarrow{\mu_0^{\,t}} = (0,1,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_0^{\,r}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_0^{\,tc}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_0^{\,rc}} = (0,0,0,0)^T,$$

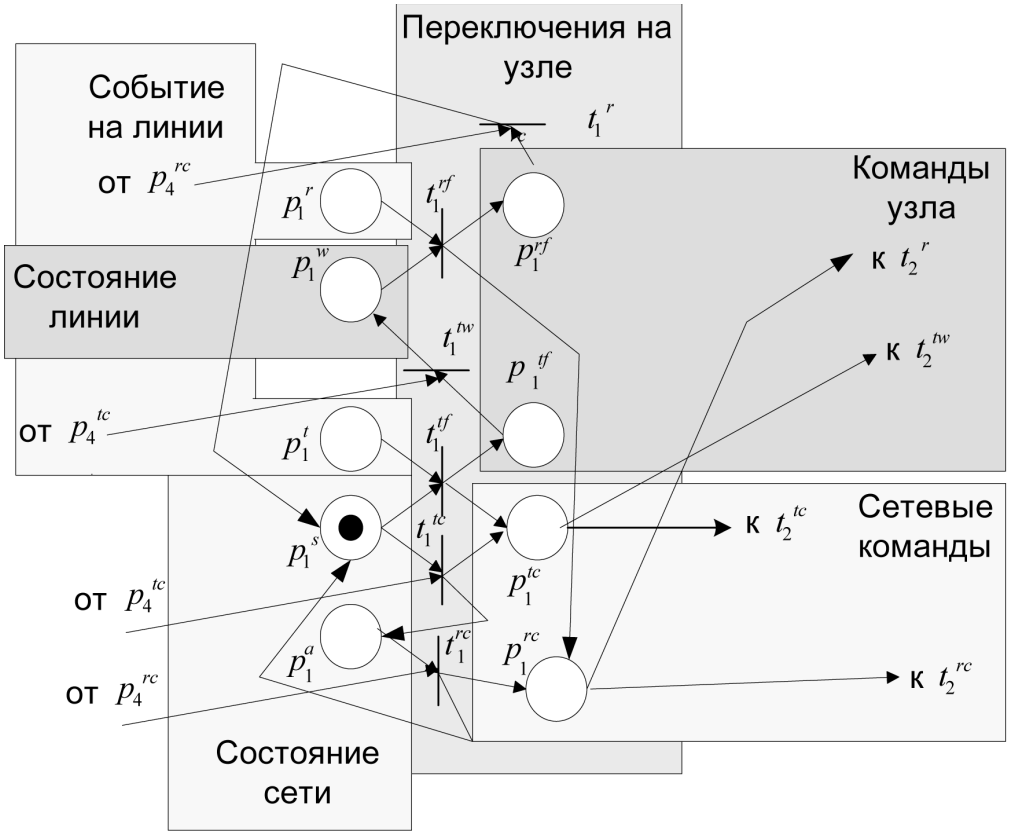

Рис. 1. Графическая модель функционирования подсистемы управления сетевым ресурсом для одного узла связи

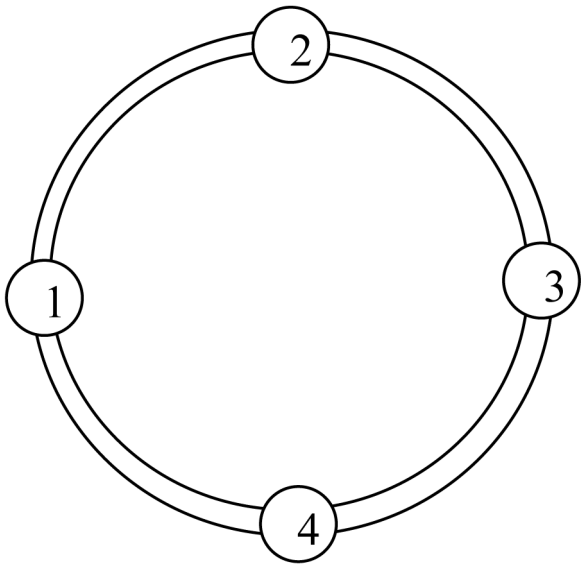

Рис. 2. Модель транспортной составляющей ТКС с четырьмя узлами связи

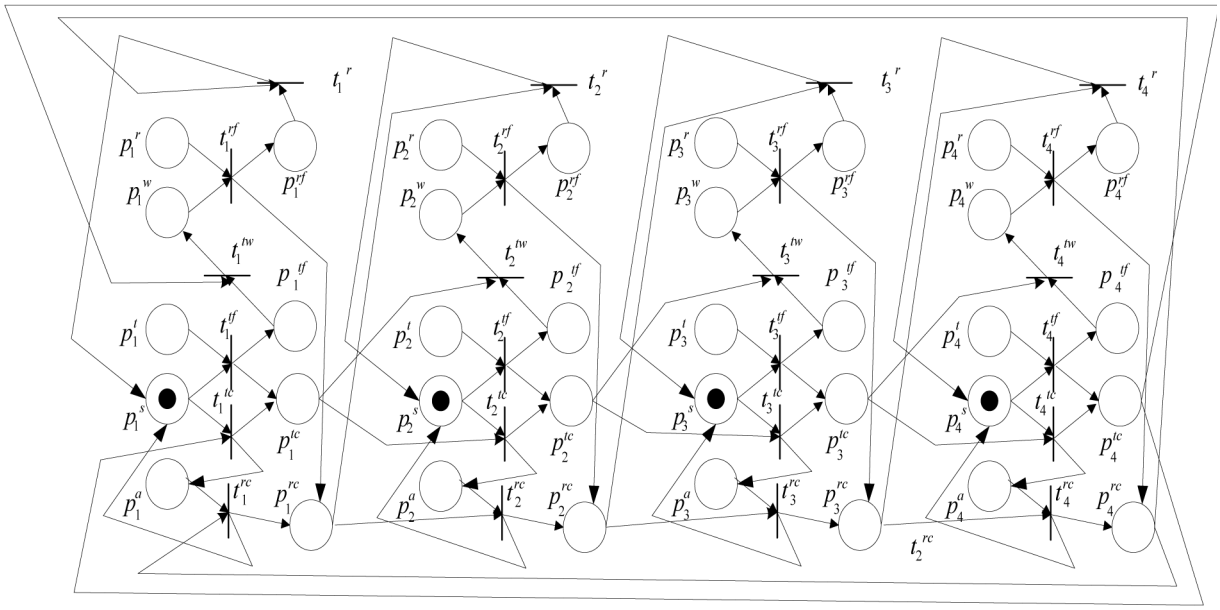

Рис. 3. Графическая модель функционирования подсистемы управления сетевым ресурсом для четырех узлов связи

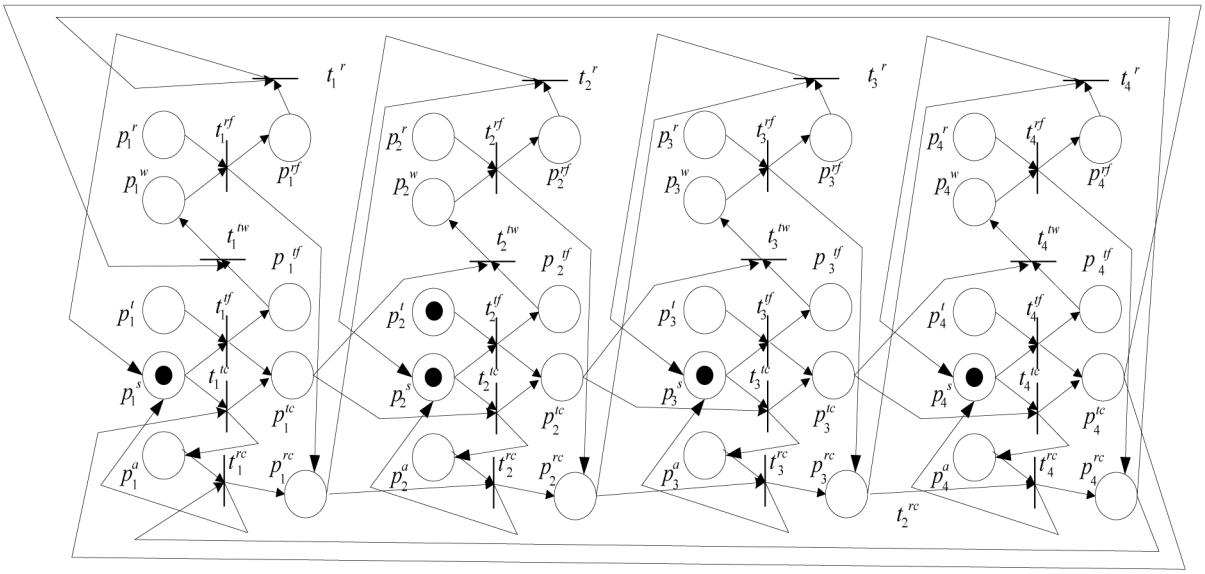

Рис. 4. Графическая модель начальной маркировки подсистемы управления сетевым ресурсом для четырех узлов связи

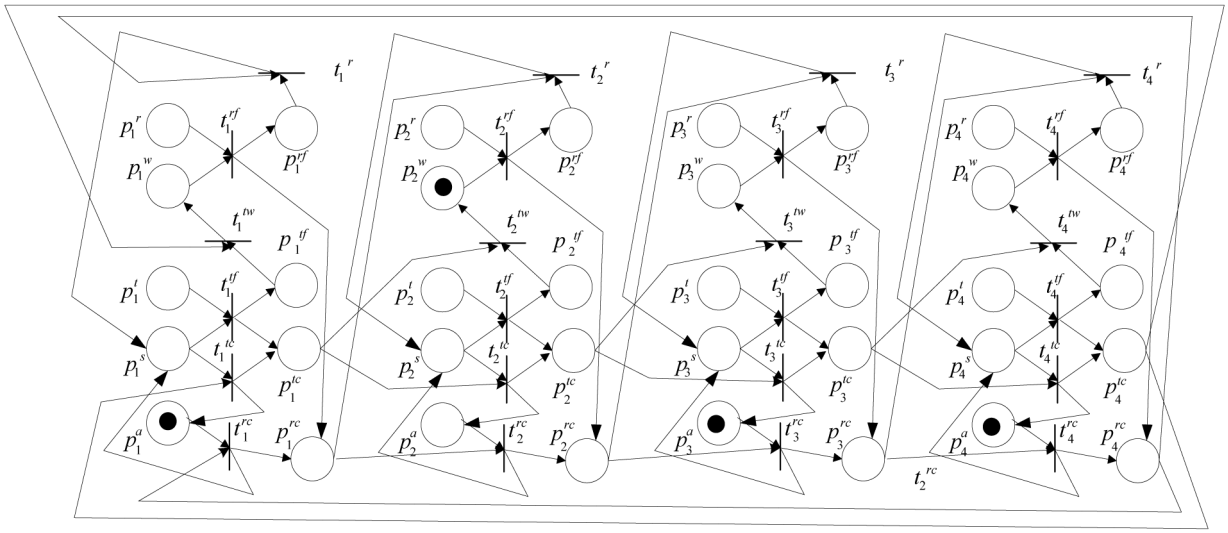

Рис. 5. Графическая модель финальной маркировки подсистемы управления сетевым ресурсом для четырех узлов связи

$$\mu_0^{\overrightarrow{tf}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_0^{rf}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_0^{s}} = (1,1,1,1)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_0^{w}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_0^{a}} = (0,0,0,0)^T. \qquad (2)$$

При этом считается, что изначально сеть находится в режиме нормального функционирования, а затем возникает авария на участке 1–2, тогда графическая модель начальной маркировки для транспортной составляющей ТКС с четырьмя узлами связи будет иметь вид, представленный на рисунке 4.

После получения начальной маркировки (2) сработает переход t_2^{tf} и маркер перейдет в позиции p_2^{tc} и p_2^{tf}, что соответствует подаче команды «переход на резерв» и к состоянию системы резервирования второго узла «режим занятия резерва». В результате первая промежуточная маркировка будет иметь вид:

$$\overrightarrow{\mu_1^{t}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_1^{r}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_1^{tc}} = (0,1,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_1^{rc}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_1^{tf}} = (0,1,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_1^{rf}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_1^{s}} = (1,0,1,1)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_1^{w}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_1^{a}} = (0,0,0,0)^T. \qquad (3)$$

Вопрос о потенциальной реализуемости рассматриваемого варианта сводится к решению задачи о достижимости финальной маркировки:

$$\overrightarrow{\mu_f^{t}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_f^{r}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_f^{tc}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_f^{rc}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_f^{tf}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_f^{rf}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_f^{s}} = (0,0,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_f^{w}} = (0,1,0,0)^T,$$
$$\overrightarrow{\mu_f^{a}} = (1,0,1,1)^T. \qquad (4)$$

Графически модель финальной маркировки для транспортной сети ТКС из четырех узлов связи представлена на рисунке 5. Полученная финальная маркировка указывает на аварию второго участка линий – маркер в позиции p_2^w, а сеть работает в режиме резервирования, то есть в позициях $P^s = \{p_1^s, p_2^s, ..., p_4^s\}$ нет маркеров.

Таким образом, за счет оценивания различных вариантов начальных маркировок с применением для моделирования сетей Петри при разных исходных состояниях структуры транспортной сети, возникает возможность оценивать работоспособность подсистемы управления сетевым резервированием при воздействии потока отказов и аварий, а также учитывать время перехода на резерв и время освобождения резерва.

Литература

1. Котов, В. Е. Сети Петри / В.Е. Котов. – М.: Наука, 1984. – 160 с.

2. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем : [пер. с англ.] / Дж. Питерсон. – М. : Мир, 1984. – 264 с.

3. Hura, G. S. Petri net as a modeling tool / G.S. Hura // Microelectronics and reliability. – 1982. – Vol. 22. – No. 3. – P. 433–439.