Применение сетей Петри для моделирования и верификации протоколов обеспечения транспортной безопасности

Applying Petri nets for simulation and verification of transport safety provision record

Юдаев / Yudaev V.
Вячеслав Владимирович
(yvv2210@mail.ru)
ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева»,
старший преподаватель кафедры обеспечения авиационной безопасности.
г. Ульяновск

Зубков / Zubkov B.
Борис Васильевич
(bpigd@mail.ru)
доктор технических наук, профессор,
действительный член Академии наук авиации и воздухоплавания.
ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации»,
профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности.
г. Москва

Ключевые слова: сети Петри – Petri net; транспортная безопасность – transport safety; предполетный досмотр – preflight inspection; акт незаконного вмешательства – illegal intervention act; моделирование – simulation.

В статье рассматривается применение сетевых моделей с использованием аппарата сетей Петри для моделирования процессов обеспечения транспортной (авиационной) безопасности. Реализованная в программной среде CPN Tools динамическая имитационная модель предполетного досмотра пассажиров, их ручной клади и багажа позволяет осуществлять проверку определяемого требованиями руководящих документов порядка функционирования пункта досмотра, оценивать его пропускную способность и определять временные характеристики.

The paper considers applying network models using Petri net apparatus to simulate transport (aviation) safety provision processes. Dynamic simulation model for passenger, carry-on luggage and baggage preflight inspection implemented in CPN Tools software environment allows for carrying out verification of check point operating procedure determined by the requirements of regulatory documents, assessing its throughput capacity, and define temporal features.

Введение

Динамичное и поступательное развитие экономики любого государства неразрывно связано с перемещением больших объемов людских, материальных, информационных и других видов ресурсов. Это особенно актуально для России, с ее огромными территориями и площадями. Важную роль в этом процессе играет транспортная система страны. От ее четкой и бесперебойной работы напрямую зависит своевременная доставка пассажиров и грузов, обеспечивается экономическая интеграция предприятий удаленных регионов и крупных промышленных центров. Дальнейшее совершенствование транспортной системы невозможно без повышения качества системы безопасности всего процесса транспортных перевозок.

Для повышения эффективности противодействия актам незаконного вмешательства (АНВ) в функционирование транспортного комплекса в настоящее время широко применяется математическое моделирование процессов, непосредственно связанных с транспортными перевозками и обладающих рядом трудно формализуемых характеристик.

Сети Петри и их модификации находят все большее применение при моделировании технологических процессов в сложных организационно-технических системах. Это позволяет адекватно представлять не только структуры систем и комплексов, но также и логико-временные особенности процессов их функционирования [1]. Получаемая при этом информация может быть использована для оценки моделируемой системы и выработки предложений по ее совершенствованию и адаптации к конкретным условиям.

В качестве примера рассмотрим применение сетей Петри для моделирования процесса предполетного досмотра пассажиров, ручной клади и багажа, являющегося одним из важнейших направлений обеспечения транспортной (авиационной) безопасности и верификации его протокола. При этом под протоколом обеспе-

чения транспортной безопасности будем понимать совокупность установленных законами, постановлениями, приказами и инструкциями правил и порядок взаимодействия пассажиров и сотрудников подразделений транспортной безопасности на объектах транспортной инфраструктуры и транспортных средствах в целях обеспечения безопасности транспортных перевозок.

Сети Петри математический аппарат для моделирования динамических дискретных систем. Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный граф, состоящий из вершин двух типов позиций и переходов, соединённых между собой дугами, вершины одного типа не могут быть соединены непосредственно. В позициях могут размещаться метки (маркеры), способные перемещаться по сети. В сетях Петри условия отображаются позициями, а события – переходами. Последовательная реализация событий в моделируемой системе отображается в сети Петри в виде последовательного срабатывания ее переходов. Переход разрешен (возбужден), если в каждой из его входных позиций находятся фишки в количестве не меньше, чем число дуг, соединяющих эту позицию с данным переходом. Из множества разрешенных переходов срабатывает произвольный переход. Для управления последовательностью срабатывания переходов вводятся приоритеты. При срабатывании перехода из всех его входных позиций удаляются фишки с учетом кратности дуг и помещаются в выходные позиции (с учетом кратности дуг). Срабатывание перехода происходит мгновенно. Для повышения производительной мощности сетей Петри используются их модификации. Иерархические временные цветные сети Петри являются универсальной алгоритмической системой. Именно эти сети позволяют моделировать любой произвольный объект или систему любой сложности [2].

Использование сетей Петри для построения модели процесса предполетного досмотра

Сеть Петри, моделирующая процесс проведения предполетного досмотра пассажиров, их ручной клади и багажа, представлена на рисунке 1.

Аналитически данная маркированная сеть Петри может быть представлена в следующем виде [3]: $C = (P, T, I, O, M_0)$, где P – непустое конечное множество позиций; T – непустое конечное множество переходов (множества P и T не пересекаются); $P \cap T = \varnothing$); $I : P \times T \to N_0$ – входная функция переходов; $O : T \times P \to N_0$ – выходная функция переходов; M_0 – начальная маркировка сети; $N_0 = \{0,1,2,...\}$ – множество натуральных чисел и ноль.

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16}, p_{17}, p_{18}, p_{19}, p_{20}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}, p_{25}, p_{26}, p_{27}, p_{28}\};$$

$$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{16}, t_{17}, t_{18}, t_{19}, t_{20}, t_{21}, t_{22}, t_{23}\};$$

$$I(t_1) = \{p_1, p_2\}; I(t_2) = \{p_4\}; I(t_3) = \{p_2, p_9\};$$
$$I(t_4) = \{p_3\}; I(t_5) = \{p_2, p_{13}\}; I(t_6) = \{p_5,\};$$
$$I(t_7) = \{p_7\}; I(t_8) = \{p_8\}; I(t_9) = \{p_2, p_{18}\};$$
$$I(t_{10}) = \{p_6\}; I(t_{11}) = \{p_{11}\}; I(t_{12}) = \{p_{12}\};$$
$$I(t_{13}) = \{p_2, p_{24}\}; I(t_{14}) = \{p_{20}\};$$
$$I(t_{15}) = \{p_{15}\}; I(t_{16}) = \{p_{16}\}; I(t_{17}) = \{p_{17}\};$$
$$I(t_{18}) = \{p_9, p_{13}, p_{18}, p_{24}\}; I(t_{19}) = \{p_{21}\};$$
$$I(t_{20}) = \{p_{22}\}; I(t_{21}) = \{p_{23}\}; I(t_{22}) = \{p_{26}\};$$
$$I(t_{23}) = \{p_{27}\};$$

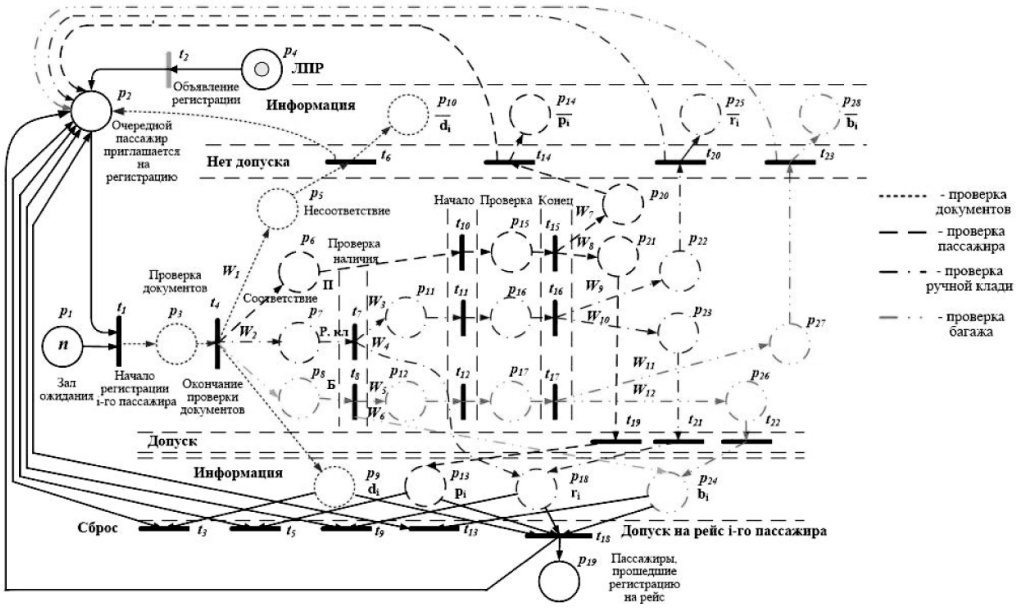

Рис. 1. Сеть Петри, моделирующая процесс предполетного досмотра

$$O(t_1)=\{p_3\};O(t_2)=\{p_2\};O(t_4)=\{p_5,p_6,p_7,p_8,p_9\};$$
$$O(t_6)=\{p_2,p_{10}\};O(t_7)=\{p_{11},p_{18}\};$$
$$O(t_8)=\{p_{12},p_{24}\};O(t_{10})=\{p_{15}\};O(t_{11})=\{p_{16}\};$$
$$O(t_{12})=\{p_{17}\};O(t_{14})=\{p_2,p_{14}\};$$
$$O(t_{15})=\{p_{20},p_{21}\};O(t_{16})=\{p_{22},p_{23}\};$$
$$O(t_{17})=\{p_{26},p_{27}\};O(t_{18})=\{p_2,p_{19}\};$$
$$O(t_{19})=\{p_{13}\};O(t_{20})=\{p_2,p_{25}\};O(t_{21})=\{p_{18}\};$$
$$O(t_{22})=\{p_{24}\};O(t_{23})=\{p_2,p_{28}\};$$

Следующая маркировка сети является начальной: $M_0=\{n,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0\}$ – что соответствует нахождению n фишек в позиции p_1 (пассажиры, приобретшие билеты на данный рейс и находящиеся в зале ожидания) и 1 фишки в позиции p_4 – администрация аэропорта (ЛПР) приняла решение об отправке очередного рейса по запланированному маршруту: ВС готово, метеоусловия соответствуют, рейс запланирован.

Сеть работает следующим образом. В соответствии с требованиями руководящих документов [4, 5] все пассажиры допускаются на рейс после прохождения предполетного досмотра.

В ходе досмотра в целях обеспечения транспортной безопасности осуществляются мероприятия по обследованию физических лиц, а также транспортных средств, грузов, багажа, ручной клади и личных вещей, находящихся у физических лиц, и иных материальных объектов живой или неживой природы (далее объекты досмотра), в целях обнаружения оружия, взрывчатых веществ или других устройств, предметов и веществ, в отношении которых установлен запрет или ограничение на перемещение в зону транспортной безопасности или ее часть [5].

Пассажир допускается на рейс, если по всем проверяемым атрибутам («d_i – документы», «p_i – пассажир», «r_i – ручная кладь» и «b_i – багаж») он получает допуск. Пассажир не допускается на рейс, если хотя бы по одному из проверяемых атрибутов он не соответствует требованиям. При этом под несоответствием понимаются недостатки, которые не могут быть устранены в ходе проверки, а также если у пассажира в его ручной клади или в багаже при проведении досмотра обнаружены запрещенные к перевозке предметы (вещества), которые могут использоваться для совершения АНВ.

При заданной маркировке сети переход t_2 становится разрешенным. При его срабатывании, что соответствует объявлению регистрации на рейс, фишка из позиции p_4 убирается, а одна фишка появляется в позиции p_2. Это соответствует приглашению пассажиров к стойке (стойкам) регистрации. Становится разрешенным переход t_1. При его срабатывании, что соответствует началу регистрации i-го пассажира, по одной фишке удаляются из позиций p_1, p_2, а одна фишка помещается в позицию p_3. Это соответствует процессу проверки документов у очередного пассажира. Становится разрешенным переход t_4, соответствующий окончанию проверки документов у очередного пассажира и принятию решения о соответствии или несоответствии документов требованиям для перевозки. При срабатывании перехода t_4 фишка из позиции p_3 убирается и либо одна фишка с вероятностью W_1 появляется в позиции p_5 (документы не соответствуют), либо по одной фишке с вероятностью W_2 (документы соответствуют) помещается в позиции p_6, p_7, p_8, p_9. При этом $W_1+W_2=1$. Если фишка появилась в позиции p_5 (документы не соответствуют), то разрешенным становится переход t_6. При его срабатывании, что соответствует отказу в допуске пассажира на рейс по причине несоответствия документов, фишка убирается из позиции p_5 и по одной фишке появляется в позициях p_{10} (собирается информация о не допущенных на рейс пассажирах из-за несоответствия документов) и p_2 (следующий пассажир приглашается на регистрацию). При появлении по одной фишке в позициях p_6, p_7, p_8, что соответствует необходимости продолжения проверки по атрибутам «p_i – пассажир», «r_i – ручная кладь» и «b_i – багаж», разрешенными становятся переходы t_6, t_7, t_8 соответственно. Появление фишки в позиции p_9 означает, что очередной пассажир по атрибуту «d_i документы» может быть допущен на рейс (отображается информация о ходе досмотра i-го пассажира – документы соответствуют требованиям).

Срабатывание перехода t_7 соответствует проверки наличия у пассажира ручной клади. При этом одна фишка убирается из позиции p_7 и, если у пассажира с вероятностью W_4 отсутствует ручная кладь, то одна фишка появляется в позиции p_{18} (отображается информация о ходе досмотра i-го пассажира, к которому нет претензий по атрибуту «r_i – ручная кладь»). Если же у пассажира с вероятностью W_3 имеется ручная кладь, одна фишка появляется в позиции W_3, что соответствует требованию к пассажиру предоставить ее на досмотр. При этом $W_3+W_3=1$. Наличие фишки в позиции p_{11} делает разрешенным переход t_{11}, его срабатывание соответствует началу проверки ручной клади. При этом фишка убирается из позиции p_{11}, и одна фишка появляется в позиции p_{16}, что соответствует процессу проверки ручной клади и делает разрешенным переход t_{16}, срабатывание которого соответствует окончанию проверки и принятию решения о соответствии или несоответствии ручной клади требованиям для перевозки. При срабатывании перехода t_{16} фишка убирается из позиции p_{16} и, либо одна фишка с вероятностью W_9 появляется в позиции t_{22} (ручная кладь не соответствует), либо одна фишка с вероятностью W_{10} помещаются в позицию p_{23} (ручная кладь соответствует). При этом $W_9+W_{10}=1$. Если фишка появилась в позиции p_{22} (ручная кладь не соответствует), то разрешенным становится переход p_{20}. При его срабатывании, что соответствует отказу в допуске пассажира на рейс по причине несоответствия ручной клади, фишка убирается из позиции p_{22} и по одной фишке появляется в позициях p_{25} (собирается информация

о не допущенных на рейс пассажирах из-за несоответствия ручной клади) и p_2 (следующий пассажир приглашается на регистрацию). Если фишка появилась в позиции p_{23} (ручная кладь соответствуют), то становятся разрешенным переход t_{21}. При срабатывании перехода t_{21} (допуск на рейс по атрибуту «r_i – ручная кладь») одна фишка из позиции p_{23} убирается и одна фишка появляется в позиции p_{18} (собирается информация о пассажире, к которому нет претензий по атрибуту «r_i – ручная кладь»).

Аналогично срабатывание перехода t_8 соответствует проверки наличия у пассажира багажа. При этом одна фишка убирается из позиции p_8. Если у пассажира с вероятностью W_6 отсутствует багаж, то одна фишка появляется в позиции p_{24} (собирается информация о проверяемом пассажире, к которому нет претензий по атрибуту «b_i – багаж»). Если же у пассажира с вероятностью W_5 имеется багаж, одна фишка появляется в позиции p_{12}, что соответствует требованию к пассажиру предоставить его на досмотр. При этом $W_5+W_5=1$. Наличие фишки в позиции p_{12} делает разрешенным переход t_{12}, его срабатывание соответствует началу проверки багажа. При этом фишка убирается из позиции p_{12} и одна фишка появляется в позиции p_{17}. Это соответствует процессу проверки багажа и делает разрешенным переход t_{17}. Его срабатывание соответствует окончанию проверки и принятию решения о соответствии или несоответствии багажа требованиям для перевозки. При срабатывании перехода t_{17} фишка убирается из позиции p_{17} и либо одна фишка с вероятностью W_{11} появляется в позиции p_{27} (багаж не соответствует), либо одна фишка с вероятностью W_{12} помещаются в позицию p_{26} (багаж соответствует). При этом $W_5+W_6=1$. Если фишка появилась в позиции p_{27} (багаж не соответствует), то разрешенным становится переход t_{26}. При его срабатывании, что соответствует отказу в допуске пассажира на рейс по причине несоответствия багажа, фишка убирается из позиции p_{27} и по одной фишке появляются в позициях p_{28} (собирается информация о не допущенных на рейс пассажирах из-за несоответствия багажа) и p_2 (следующий пассажир приглашается на регистрацию). Если фишка появилась в позиции p_{26} (багаж соответствует), то становятся разрешенным переход t_{22}. При срабатывании перехода t_{22} (допуск на рейс по атрибуту «b_i – багаж») одна фишка из позиции p_{26} убирается и одна фишка появляется в позиции p_{24} (собирается информация о пассажире, к которому нет претензий по атрибуту «b_i – багаж»).

Срабатывание перехода t_{10} соответствует началу проверки самого пассажира и его одежды. При этом одна фишка убирается из позиции p_6 и одна фишка помещается в позицию p_{15}, что соответствует процессу проверки самого пассажира и его одежды. Наличие фишки в позиции p_{15} делает разрешенным переход t_{15}, его срабатывание соответствует окончанию проверки и принятию решения о соответствии или не соответствии пассажира и его одежды требованиям для перевозки. При срабатывании перехода t_{15} фишка убирается из позиции t_{15} и либо одна фишка с вероятностью W_7 появляется в позиции p_{20} (пассажир и/или его одежда не соответствуют), либо одна фишка с вероятностью W_8 помещается в позицию p_{21} (пассажир и его одежда соответствуют). При этом $W_5+W_6=1$. Если фишка появилась в позиции p_{20} (пассажир и/или его одежда не соответствуют), то разрешенным становится переход t_{14}. При его срабатывании, что соответствует отказу в допуске пассажира на рейс по причине несоответствия пассажира и/или его одежды, фишка убирается из позиции p_{20} и по одной фишке появляются в позициях p_{14} (собирается информация о не допущенных на рейс пассажирах из-за несоответствия пассажира и/или его одежды) и p_2 (следующий пассажир приглашается на регистрацию). Если фишка появилась в позиции p_{21} (пассажир и его одежда соответствуют), то становится разрешенным переход t_{19}. При срабатывании перехода t_{19} (допуск на рейс по атрибуту «p_i – пассажир») одна фишка из позиции p_{21} убирается и одна фишка появляется в позиции p_{13} (собирается информация о пассажире, допущенном на рейс по атрибуту «p_i – пассажир»).

Таким образом, чтобы пассажир был допущен на рейс, необходимо, чтобы в позициях $p_9, p_{13}, p_{18}, p_{24}$ было по одной фишке. При этом становится разрешенным переход t_{18}, соответствующий допуску на рейс проверенного (i-го) пассажира. При его срабатывании по одной фишке убираются из позиций p_9, p_{13}, p_{18}, p_{24} и одна фишка появляется в позиции p_{19}, где количество фишек будет соответствовать количеству пассажиров, прошедших регистрацию и допущенных на данный рейс. Переходы t_3, t_5, t_9, t_{13} соответствуют сбросу информации об атрибутах проверяемого пассажира, если по одному из них пассажир не будет допущен на рейс. Какие из этих переходов будут срабатывать, зависит от того, какие из атрибутов были проверены и по какому из атрибутов пассажир получил отказ в допуске. При этом для срабатывания перехода t_3 необходимо наличия фишки в позициях p_9 и p_2, перехода t_5 – в позициях p_{13} и p_2, перехода t_9 – в позициях p_{18} и p_2, перехода t_{13} – в позициях p_{24} и p_2. При срабатывании переходов t_3, t_5, t_9, t_{13} фишки убираются из позиций $p_9, p_{13}, p_{18}, p_{24}$ соответственно. При срабатывании этих переходов в позиции p_2 фишка не убывает, так как эта позиция соединена с переходами t_3, t_5, t_9, t_{13} двунаправленными дугами.

Имитационное моделирование процесса предполетного досмотра в программной среде *CPN Tools*

В качестве программной среды для моделирования заданной сети Петри применяется программа *CPN Tools*, в которой используются иерархические временные раскрашенные (цветные) сети Петри.

Понятие раскрашенной (цветной) сети Петри использует различные типы фишек, которые представляют абстрактные типы данных.

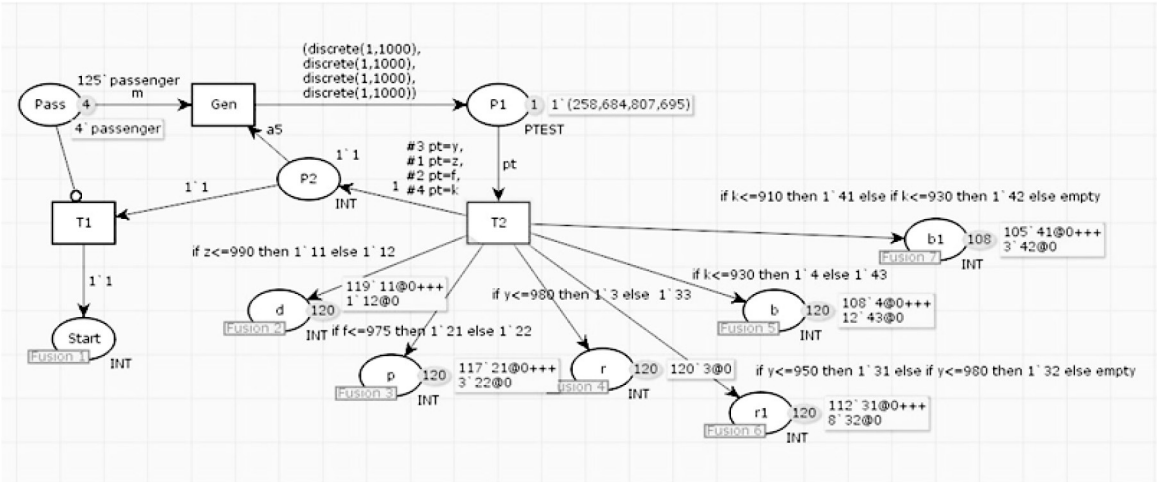

Рис. 2. Сеть Петри, формирующая исходные данные для моделирования

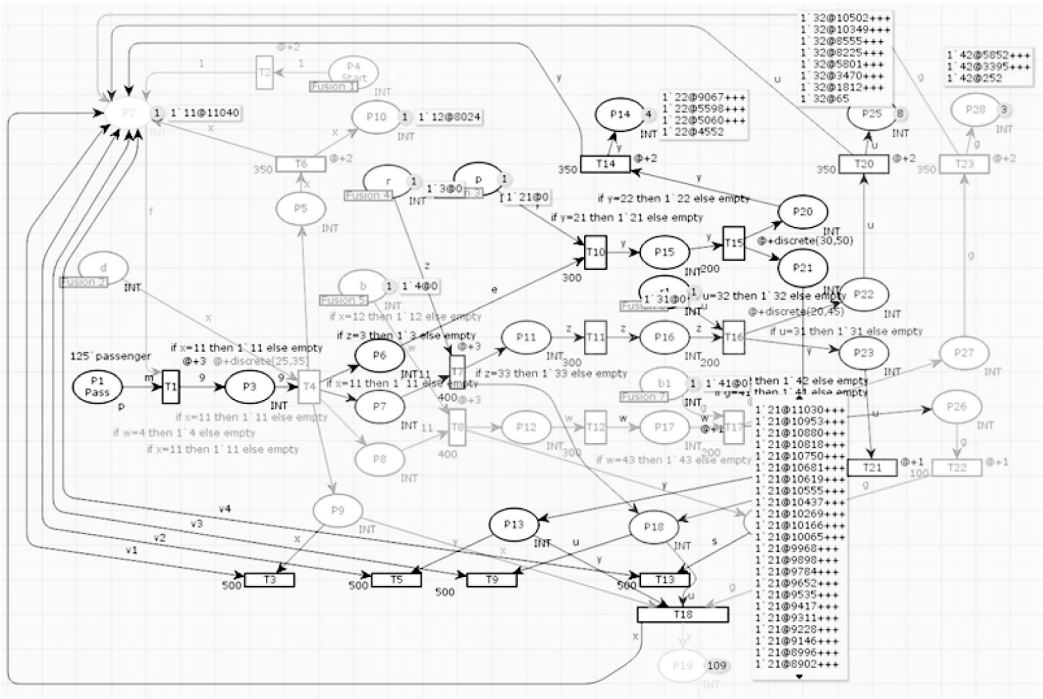

Рис. 3. Имитационная модель процесса предполетного досмотра в программе CPN Tools

Временные сети Петри используют понятие модельного времени для отображения продолжительности действий в элементах моделируемой системы.

Иерархические сети позволяют строить сложные модели, в которых элемент сети может быть представлен другой сетью.

Для проведения имитационного моделирования представим данную модель в виде композиции двух сетей Петри (страниц в *CPN Tools*):

– первая сеть Петри (рис. 2) формирует исходные данные для моделирования;

– вторая сеть Петри (рис. 3), описанная выше, непосредственно имитационная модель процесса предполетного досмотра.

Для объединения сетей используем слияние позиций. При этом позиции множества слияния дополняются тегом слияния с одним и тем же именем.

Для формирования исходных данных будем обозначать типы фишек натуральными числами:

– 1 – атрибут «d_i – документы»;

– 2 – атрибут «p_i – пассажир»;

– 3 – атрибут «r_i – ручная кладь»;

– 4 – атрибут «b_i – багаж».

При этом вторая цифра будет означать:

– 1 – соответствие атрибута требованиям для перевозки;

– 2 – несоответствие атрибута требованиям для перевозки;

– 3 – отсутствие атрибута.

Например, запись 24`11++2`12 обозначает множество, состоящее из 24 фишек типа 11, то есть документы соответствуют и двух фишек типа 12 – документы не соответствуют требованиям для перевозки.

Чтобы сформировать первой сетью Петри (рис. 2) исходные данные для моделирования, необходимо задать значение количества пассажиров на рейс и определить, какую долю из них будут составлять пассажиры, у которых проверяемые атрибуты будут не соответствовать требованиям для перевозки или отсутствовать.

Используя возможность *CPN Tools* осуществлять пошаговую имитацию поведения сложной системы, можно осуществлять поиск и устранение ошибок в разрабатываемой модели. Для получения статистических данных для анализа поведения модели программа позволяет выполнить заданное количество переходов без отображения промежуточных маркировок.

Задавая время выполнения операций при досмотре, используя атрибут «время задержки» перехода, можно анализировать временные характеристики процесса досмотра.

Заключение

Достоинство предложенной модели предполетного досмотра пассажиров, ручной клади и багажа состоит в том, что она позволяет исследовать работоспособность моделируемой системы, оптимальность ее структуры, эффективность процесса ее функционирования, оценить временные показатели, а также возможность достижения в процессе функционирования определенных состояний.

Литература

1. Зубков, Б. В. Подход к оценке эффективности функционирования службы авиационной безопасности авиапредприятия с использованием сетей Петри / Б.В. Зубков, В.В. Юдаев, Ю.А. Вербицкий // Научный вестник МГТУ ГА. – № 218 (8). – С. 71–75.

2. Окрестностное моделирование сетей Петри: монография / С.Л. Блюмин [и др.]. – Липецк : ЛЭГИ, 2010. – 124 с.

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

4. Об утверждении Правил проведения предполетного и послеполетного досмотра. Приказ Минтранса России от 25.07.07 № 104. – Введ. 09.08.07.

5. Об утверждении Правил проведения досмотра, дополнительного досмотра, повторного досмотра в целях обеспечения транспортной безопасности. Приказ Минтранса России от 23.07.15 № 227. – Введ. 24.03.16.