

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ АППАРАТА СЕТЕЙ ПЕТРИ

В.В. Юдаев.

Ульяновский институт гражданской авиации им. главного Маршала авиации Б.П. Бугаева.

А.В. Богданов, кандидат технических наук, доцент.

Государственный Эрмитаж.

О.А. Королёв.

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко

Российской академии наук

Рассмотрен подход к обеспечению авиационной безопасности аэропорта за счет повышения качества досмотра багажа путем оптимизации структуры и организации работы многоуровневой системы контроля с помощью аппарата сетей Петри. Разработана математическая модель процесса контроля багажа, базирующаяся на пяти уровнях досмотра. Реализация модели в программной среде Colored Petri nets Tools позволяет осуществить проверку установленного порядка работы пункта досмотра, оценить его пропускную способность и временные характеристики, что, в конечном счете, позволяет оптимизировать и повысить качество досмотра.

Ключевые слова: сеть Петри, авиационная безопасность, досмотр багажа, моделирование

SIMULATION OF PHYSICAL SAFETY SYSTEMS BASED ON PETRI NETS APPARATUS

V.V. Yudaev. Ulyanovsk institute of Civil Aviation named after Chief Marshal of aviation

B.P. Bugaev.

A.V. Bogdanov. State hermitage museum.

O.A. Korolev. Solomenko Institute of transport problems of the Russian academy of sciences

The approach to ensuring aviation security of the airport by improving the quality of baggage inspection by optimizing the structure and organization of the multi-level control system using the Petri nets is considered. A mathematical model of the baggage control process has been developed, based on five inspection levels. The implementation of the model in the Colored Petri nets Tools software environment allows you to verify the established procedure for the operation of the inspection point, evaluate its throughput and time characteristics, which ultimately allows you to optimize and improve the quality of inspection.

Keywords: Petri net, aviation security, inspection of baggage, simulation

Совершенствование транспортного процесса сопровождается усложнением транспортных технологий и инфраструктур при одновременном росте потенциальных угроз, что, в свою очередь, диктует ужесточение требований к безопасности транспортировки. Это в полной мере относится и к воздушному транспорту, который по прогнозу до 2030 г. будет развиваться темпами, значительно превышающими мировые тенденции [1].

Важнейшей мерой обеспечения безопасности воздушных перевозок, установленной руководящими документами [2, 3], является предполетный досмотр и контроль перевозимого багажа. Одной из проблем в этой области является необходимость технического оснащения авиапредприятий современной аппаратурой обнаружения запрещенных к перевозке

предметов и реорганизация системы предполетного обслуживания пассажиров [4]. Для исследования такой сложной организационно-технической системы целесообразно использовать математический аппарат сетей Петри (СП), применение которого рассмотрено в работах [5–7].

Структура многоуровневого процесса обработки багажа

Наибольшая эффективность процесса досмотра багажа достигается при комплексном применении новейших технических средств, таких как автоматизированные рентгеновские системы высокой пропускной способности, системы для обнаружения взрывчатых веществ, взрывных устройств и др. [8].

Для разработки структуры многоуровневой системы досмотра применяется классическая задача оптимального синтеза [9].

Пусть $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ – множество технических средств и также операторов, участвующих в проведении досмотра (k – число уровней досмотра); $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_g\}$ – множество условий (вариантов) функционирования системы досмотра; $Q: X \times Y \rightarrow R$ (где R – множество вещественных чисел) – функционал, определяющий значение $Q\{x, y\}$ обобщенного показателя эффективности процесса досмотра (вероятность обнаружения запрещенных к перевозке предметов и/или веществ – $P_{\text{обн}}^i$, $i = 1, 2, \dots, k$) для любых элементов $x \in X$ и $y \in Y$.

При заданном элементе $y_0 \in Y$, определяющем условия функционирования системы досмотра, необходимо обеспечить максимум ОПЭ $Q\{x, y_j\}$ для конкретных условий $y = y_0$ досмотра, осуществляемого элементами $x \in X$ $Q\{x, y_0\} \rightarrow \max$. Решением задачи будет множество $x_\varepsilon(x, y_0)$ ε – оптимальных систем x_ε ($\varepsilon \geq 0$), определяемое выражением $x_\varepsilon \in x_\varepsilon(x, y_0) \Leftrightarrow Q(x, y) \leq Q(x_\varepsilon, y_0) + \varepsilon$.

Для оптимизации многоуровневого процесса досмотра следует обеспечить [8]:

- а) минимизацию уровней досмотра ($k \rightarrow \min$);
- б) передачу информации с предыдущего уровня на последующий;
- в) последовательное повышение эффективности каждого следующего уровня досмотра ($P_{\text{обн}}^i > P_{\text{обн}}^{i-1}$ и $t_i > t_{i-1}$, где t_i – время досмотра багажа на i уровне);
- г) «безотказность» процесса досмотра;
- д) при отсутствии удовлетворительных результатов досмотра на i уровне багаж должен быть направлен на следующий более высокий уровень;
- е) если статус багажа остаётся неопределённым, он считается не прошедшим проверку и подвергается дополнительным процедурам досмотра, багаж, вызывающий какие-либо сомнения, не пропускается;
- ж) каждый предмет багажа рассматривается как непроверенный, если невозможно установить отсутствие ограниченных или запрещенных к перевозке предметов. В основе большинства используемых в мировой практике систем досмотра лежит пятиуровневая модель, первые два уровня которой интегрированы в операции системы обработки багажа [9] (рис. 1).

На уровнях 1–3 комплексной системы досмотра применяются различные типы специальных технических средств досмотра, уровень 4 предполагает ручной досмотр в присутствии пассажира, при поступлении багажа на уровень 5 оператор в целях безопасности уведомляет соответствующие полномочные органы (включая полицию) и руководство аэропорта для принятия установленных мер, включая вызов специалистов по обезвреживанию боеприпасов.

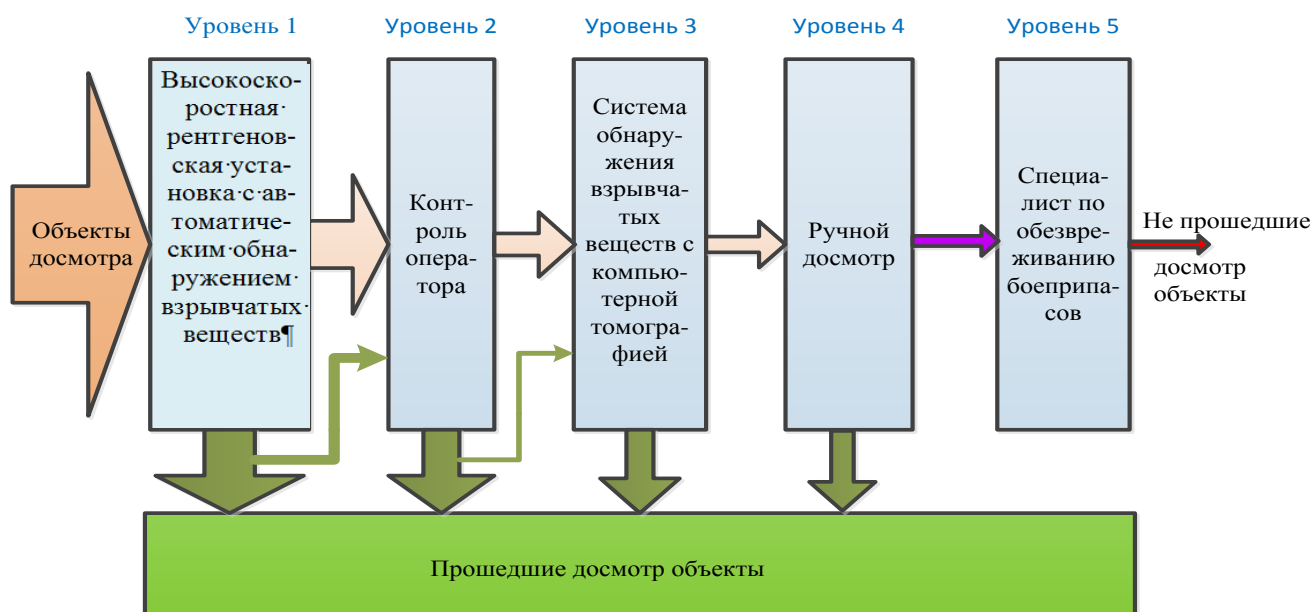


Рис. 1. Общая модель пятиуровневой системы досмотра багажа

Сеть Петри, моделирующая процесс досмотра багажа

В работе [10] предложена СП, моделирующая процесс предполетного досмотра пассажиров, ручной клади и багажа (рис. 2). На её основе разработана динамическая имитационная модель процесса предполетного досмотра, которая реализована в программной среде Colored Petri nets (CPN) Tools. В этой модели использованы следующие атрибуты досмотра: « d_i – документы», « p_i – пассажир», « g_i – ручная кладь», « b_i – багаж», которым соответствуют типы фишек, выраженные числами: 1, 2, 3, 4 соответственно.

Из рис. 2 видно, что пассажир допускается на рейс, если он получает допуск по всем проверяемым атрибутам и не допускается, если хотя бы по одному из атрибутов он не соответствует требованиям и это несоответствие не может быть устранено в ходе досмотра, а также при обнаружении запрещенных к перевозке предметов (веществ).

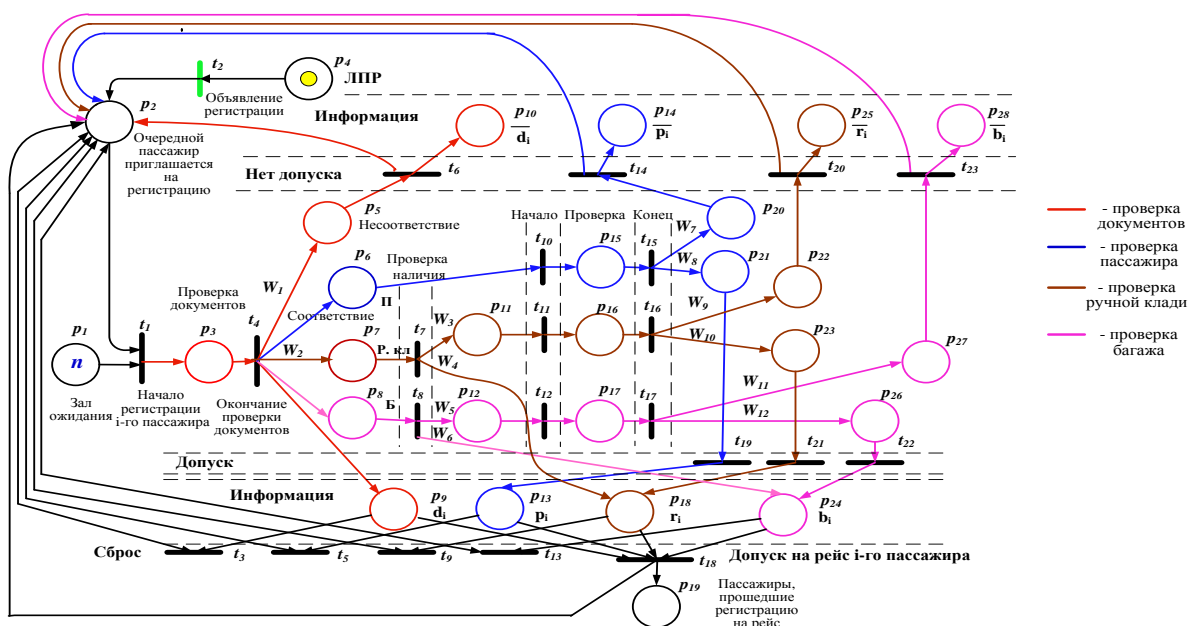


Рис. 2. СП, моделирующая процесс предполетного досмотра (ЛПР – лицо, принимающее решение)

При разработке модели использовалось следующее обозначение типа фишек: 4 – досматриваемый багаж; 41 – багаж без «закладок»; 42 – багаж с «закладками»; 412 – багаж без «закладок», ошибочно не прошедший проверку (ложная тревога); 421, 422, 423, 424 – багаж с «закладками», который не был обнаружен соответственно на 1, 2, 3 и 4 уровнях досмотра.

СП, моделирующая процесс пятиуровневого досмотра, представлена на рис. 3. Ее аналитическое представление имеет вид [2]: $C = (P, T, I, O, H, M_0)$, где P – непустое конечное множество позиций; T – непустое конечное множество переходов, причём $P \cap T = \emptyset$; $I: P \times T \rightarrow N_0$ – входная функция переходов; $O: T \times P \rightarrow N_0$ – выходная функция переходов; H – множество ингибиторных дуг. При этом $P_h = \{p_h | (p_h, t) \in H\}$ – множество ингибиторных позиций, $p_h \in P_h$; M_0 – начальная маркировка сети; $N_0 = \{0, 1, 2, \dots\}$ – множество натуральных чисел и ноль.

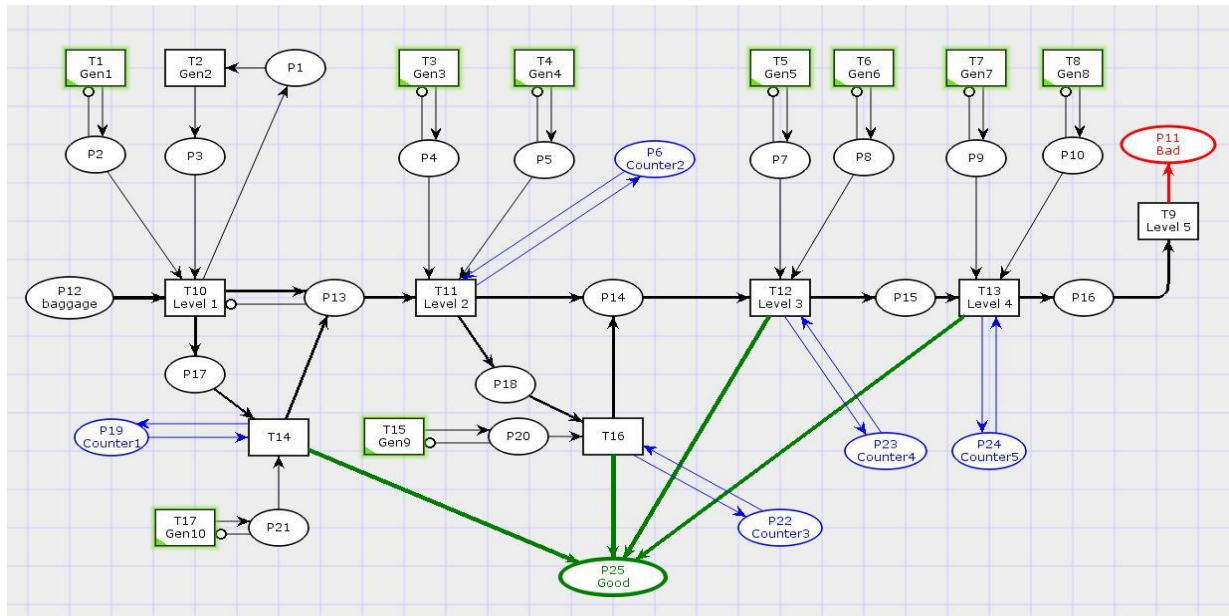


Рис. 3. СП, моделирующая пятиуровневую систему контроля

Для удобства представления этой сети используется матричный подход, основанный на её описании двумя матрицами D^- и D^+ , представляющими входную (рис. 4) и выходную (рис. 5) функции сети. Каждая матрица имеет m строк (по одной на переход) и n столбцов (по одному на позицию).

Матрицы определяются как $D^-(j, i) = K(P_i, I(t_j))$ и $D^+(j, i) = K(P_i, O(t_j))$. D^- описывает входы в переходы, D^+ – выходы из переходов, K – кратность позиции по входам и выходам.

	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}
t_1	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
t_2	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
t_3	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_4	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_5	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_6	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_7	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_{10}	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_{11}	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_{12}	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
t_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
t_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
t_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
t_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
t_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0

Рис. 4. Матрица, представляющая входную функцию СП

Для моделирования стохастических характеристик в CPN Tools используются случайные функции. Из известных способов их описания выбраны свободные (несвязанные) переменные выходных дуг переходов, значения которых не определены входными дугами и другими атрибутами, им присваиваются случайные значения во время работы сети.

	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}
t_1	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
t_2	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
t_3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t_{10}	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
t_{11}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
t_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
t_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
t_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
t_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
t_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
t_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Примечание: 0 – дуга отсутствует; 1 – дуга имеется; -1 – ингибиторная дуга

Рис. 5. Матрица, представляющая выходную функцию СП

Сеть состоит из следующих групп элементов:

- переходы $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_{15}, t_{17}$, моделирующие работу генераторов дискретных чисел, равномерно распределенных в определенном диапазоне;
- переходы $t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}$, моделирующие работу оборудования и операторов на уровнях досмотра по выявлению запрещенных к перевозке предметов;
- переходы t_{14}, t_{16} , моделирующие отправку части багажа, прошедшего проверку на первом и втором уровнях досмотра, на дополнительную проверку на следующий (соответственно, второй или третий) уровень;
- позиции $p_6, p_{19}, p_{22}, p_{23}, p_{24}$, моделирующие работу счетчиков срабатываний соответствующих переходов $t_{11}, t_{14}, t_{16}, t_{12}, t_{13}$. При этом через первый уровень досмотра проходит весь багаж, через второй – багаж, которому отказано в пропуске на первом уровне плюс часть багажа, прошедшего проверку на первом уровне и случайным образом отобранного для дополнительной проверки на втором уровне. Через третий уровень проходит багаж, которому отказано в пропуске на втором уровне плюс часть багажа, случайным образом отобранного для дополнительной проверки на третьем уровне;
- позиции p_{11}, p_{25} – моделирующие накопители, регистрирующие количество багажа, не прошедшего досмотр, и количество багажа, направленного на сортировку.

При использовании временных СП срабатывание перехода связано с определенной продолжительностью или временной задержкой. Это позволяет анализировать временные характеристики реальных объектов сети.

Для моделирования необходимо задать следующие исходные данные:

- значения параметров и характеристик используемого досмотрового оборудования: вероятность обнаружения $P_{обн}^i$ и вероятность ложной тревоги $P_{лт}^i$ для каждого уровня досмотра;
- необходимое время на проведение процедуры досмотра на каждом уровне t_i ;
- количество проверяемого (например, в течение одного дня) багажа N_B ;
- количество багажа с «закладками» (за один день работы пункта) n_3^j , где $j = 1, 2, \dots, s$;
- s – число вариантов «закладок»;
- коэффициент возврата на второй уровень случайным образом отобранной части

багажа, прошедшего проверку на первом уровне α_1 ;

– коэффициент возврата на третий уровень случайным образом отобранной части багажа, прошедшего проверку на втором уровне α_2 .

Проведено исследование зависимости коэффициентов пропуска (не обнаружения) «закладок», имитирующих запрещенные к перевозке предметы (вещества) от конкретных параметров и характеристик досмотрового оборудования и организационных мер, связанных с изменениями уровня безопасности.

Для разработанной СП, представленной на рис. 1, эту зависимость в общем виде можно представить следующим выражением: $K_{np} = f(P_{обн}^1, P_{обн}^2, P_{обн}^3, P_{обн}^4, \alpha_1, \alpha_2, n_3^j)$, параметр вероятности ложной тревоги $P_{ЛТ}^i$ не учитывается, как не влияющий на коэффициент пропуска «закладок», а изменяющий лишь время проведения досмотра.

Модель позволяет исследовать следующие зависимости:

– $K_{np} = f(\alpha_1)$, при $P_{обн}^i = \text{const}$, $n_3^j = \text{const}$, $\alpha_2 = \text{const}$. Зависимость коэффициента пропуска (не обнаружения) «закладок» от коэффициента возврата на второй уровень части багажа, проверенного на первом уровне. При этом неизменны характеристики досмотрового оборудования: количество «закладок» и коэффициент возврата части багажа на третий уровень;

– $K_{np} = f(\alpha_2)$, при $P_{обн}^i = \text{const}$, $n_3^j = \text{const}$, $\alpha_1 = \text{const}$. Зависимость коэффициента пропуска (не обнаружения) «закладок» от коэффициента возврата на третий уровень части багажа, проверенного на втором уровне. При этом неизменны характеристики досмотрового оборудования, количество «закладок» и коэффициент возврата части багажа на второй уровень;

– $K_{np} = f(n_3^j)$, при $P_{обн}^i = \text{const}$, $\alpha_1 = \text{const}$, $\alpha_2 = \text{const}$. Зависимость коэффициента пропуска (не обнаружения) «закладок» от количества «закладок» различных вариантов. При этом неизменны характеристики досмотрового оборудования, коэффициент направления части багажа на второй уровень и коэффициент направления части багажа на третий уровень досмотра.

В статье развит подход к построению оптимальной структуры многоуровневого процесса досмотра багажа, основанный на рекомендациях Международной организации гражданской авиации и учитывающей технические возможности досмотрового оборудования конкретного аэропорта. Разработана математическая модель процесса досмотра, использующая аппарат СП и реализованная в моделирующей среде CPN Tools, которая позволяет исследовать работоспособность системы досмотра, оптимальность ее структуры, эффективность функционирования и оценить временные показатели, а также осуществлять проверку пункта досмотра на соответствие требованиям руководящих документов. Модель позволяет исследовать зависимости коэффициентов пропуска (не обнаружения) запрещенных к перевозке предметов (веществ) от параметров и характеристик технических средств и от принятых вариантов организации контроля багажа. Дальнейшее совершенствование модели позволит получить информацию о распределении пропусков запрещенных к перевозке предметов на каждом уровне досмотра и, как следствие, находить и ликвидировать слабые места в системе контроля. Модель может быть использована для управления процессом досмотра путем количественной оценки качества его проведения.

Литература

1. Состояние и перспективы развития парка воздушных судов гражданской авиации России / И.А. Самойлов [и др.] // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 4 (315). С. 9–16.
2. Об утверждении Правил проведения предполетного и послеполетного досмотра: Приказ Минтранса России от 25 июля 2007 г. № 104 (введ. 9 авг. 2007 г.). Доступ из справ.-правового портала «Гарант».

3. Об утверждении Правил проведения досмотра, дополнительного досмотра, повторного досмотра в целях обеспечения транспортной безопасности: Приказ Минтранса России от 23 июля 2015 г. № 227 (введ. 24 марта 2016 г.). Доступ из справ.-правового портала «Гарант».

4. Елисов Л.Н., Овченков Н.И., Фадеев Р.С. Введение в теорию авиационной безопасности / под. ред. Л.Н. Елисова. Ярославль: Филигрань, 2016. 320 с.

5. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 264 с.

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

7. Зубков Б.В., Юдаев В.В., Вербицкий Ю.А. Подход к оценке эффективности функционирования службы авиационной безопасности авиапредприятия с использованием сетей Петри // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 218 (8). С. 71–75.

8. Руководство по авиационной безопасности / утв. ген. секретарем и опубл. с его санкции. 8-е изд. Канада, Монреаль: ИКАО, 2011. 748 с.

9. Чуднов А.М. Теоретико-игровые задачи синтеза алгоритмов формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. 1991. Т. 27. Вып. 3. С. 57–65.

10. Юдаев В.В., Зубков Б.В. Применение сетей Петри для моделирования и верификации протоколов обеспечения транспортной безопасности // Информация и Космос. 2016. № 4. С. 156–161.

References

1. Sostoyanie i perspektivy razvitiya parka vozdushnyh sudov grazhdanskoj aviacii Rossii / I.A. Samojlov [i dr.] // Nauchnyj vestnik GosNII GA. 2014. № 4 (315). S. 9–16.

2. Ob utverzhdenii Pravil provedeniya predpoletnogo i poslepoletnogo dosmotra: Prikaz Mintransa Rossii ot 25 iyulya 2007 g. № 104 (vved. 9 avg. 2007 g.). Dostup iz sprav.-pravovogo portala «Garant».

3. Ob utverzhdenii Pravil provedeniya dosmotra, dopolnitel'nogo dosmotra, povtornogo dosmotra v celyah obespecheniya transportnoj bezopasnosti: Prikaz Mintransa Rossii ot 23 iyulya 2015 g. № 227 (vved. 24 marta 2016 g.). Dostup iz sprav.-pravovogo portala «Garant».

4. Elisov L.N., Ovchenkov N.I., Fadeev R.S. Vvedenie v teoriyu aviacionnoj bezopasnosti / pod. red. L.N. Elisova. Yaroslavl': Filigran', 2016. 320 s.

5. Piterson Dzh. Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem: per. s angl. M.: Mir, 1984. 264 s.

6. Okrestnostnoe modelirovanie setej Petri: monografiya / S.L. Blyumin [i dr.]. Lipeck: LEGI, 2010. 124 s.

7. Zubkov B.V., Yudaev V.V., Verbickij Yu.A. Podhod k ocenke effektivnosti funkcionirovaniya sluzhby aviacionnoj bezopasnosti aviapredpriyatiya s ispol'zovaniem setej Petri // Nauchnyj vestnik MGTU GA. 2015. № 218 (8). S. 71–75.

8. Rukovodstvo po aviacionnoj bezopasnosti / utv. gen. sekretarem i opubl. s ego sankcii. 8-e izd. Kanada, Monreal': IKAO, 2011. 748 s.

9. Chudnov A.M. Teoretiko-igrovye zadachi sinteza algoritmov formirovaniya i priema signalov // Problemy peredachi informacii. 1991. T. 27. Vyp. 3. S. 57–65.

10. Yudaev V.V., Zubkov B.V. Primenenie setej Petri dlya modelirovaniya i verifikacii protokolov obespecheniya transportnoj bezopasnosti // Informaciya i Kosmos. 2016. № 4. S. 156–161.