

Научная статья

УДК 656.7.072.51:371.693

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЕРОЯТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АКТА НЕЗАКОННОГО ВМЕШАТЕЛЬСТВА В АЭРОПОРТУ И ЕГО НЕЙТРАЛИЗАЦИИ

В. В. ЮДАЕВ, А. А. ГЛАДКИХ, Т. Г. УЛАСЮК

*Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева,
Ульяновск, Россия*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования процесса возможной реализации акта незаконного вмешательства (АНВ) в аэропорту и его нейтрализации силами сотрудников службы авиационной безопасности (САБ). Задача подготовки персонала САБ, способного эффективно действовать в сложных ситуациях, связанных с угрозой совершения АНВ и при отсутствии или недостаточной информации о событии и его последствиях, является актуальной для транспортных систем страны в современных условиях. Это требует применения новых эффективных технологий обучения специалистов САБ, основанных на компьютерном моделировании прогнозируемых ситуаций развития негативных событий. Предложенная и реализованная в программной среде CPN Tools имитационная модель позволяет наглядно отображать пространственно-временные характеристики системы «система безопасности – нарушитель» в процессе возможной реализации АНВ в аэропорту и его нейтрализации. Детализируя все протекающие процессы, задавая время выполнения отдельных операций, связанных с действиями сотрудников САБ при нейтрализации АНВ, используя атрибут «время задержки» переходов, модель даёт возможность оценивать эффективность процесса функционирования САБ при нейтрализации АНВ, в первую очередь, связанную с её временными характеристиками с учётом приведения аэропорта в различные уровни безопасности.

Ключевые слова: авиационная безопасность, акт незаконного вмешательства, моделирующая среда, моделирование, объект транспортной инфраструктуры, транспортное средство, транспортные системы страны, угроза, уязвимость, сети Петри

Для цитирования: Юдаев В. В., Гладких А. А., Уласюк Т. Г. Моделирование процесса вероятной реализации акта незаконного вмешательства в аэропорту и его нейтрализации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 42. С. 118–125.

MODELING THE PROCESS OF PROBABLE IMPLEMENTATION OF AN ACT OF UNLAWFUL INTERFERENCE IN AN AIRPORT AND ITS NEUTRALIZATION

V. V. YUDAEV, A. A. GLADKIKH, T. G. ULASYUK

Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia

Abstract. The article discusses the issues of modeling the process of the possible implementation of an act of unlawful interference (ANI) at the airport, and its neutralization by the forces of aviation security service (ASS). The task of training ASS personnel who are able to act effectively in complex situations associated

with the threat of an ANI and in the absence or insufficient information about the event and its consequences is more relevant than ever in modern conditions for transport systems of the country. This requires the use of new effective technologies for training ASS specialists, based on computer modeling of predictable situations for the development of negative events. The simulation model proposed and implemented in the CPN Tools software environment makes it possible to visually display the spatio-temporal characteristics of the "security system - intruder" system in the process of possible implementation of ANI at the airport and its neutralization. By detailing all ongoing processes, setting the execution time for individual operations related to the actions of the ASS employees during the neutralization of the ANI, using the attribute "delay time" of transitions, the model makes it possible to evaluate the efficiency of the operation of the ASS during the neutralization of the AE, primarily related to its time characteristics with considering bringing the airport to different levels of security.

Keywords: aviation security, act of unlawful interference, modeling environment, modeling, transport infrastructure object, vehicle, transport systems of the country, threat, vulnerability, Petri nets

For citation: Yudaev V. V., Gladkikh A. A., Ulasjuk T. G. Modeling the process of probable implementation of an act of unlawful interference in an airport and its neutralization, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 42, pp. 118–125. (In Russ.)

Введение

Разработка системы обеспечения безопасности аэропорта основана на учёте характеристик и особенностей конкретного аэропорта. К ним относят: прогнозируемые потенциальные угрозы; модель нарушителя; укомплектованность аэропорта техническими средствами обеспечения авиационной безопасности; их вероятностные характеристики по обнаружению нарушителя; планируемые и отработанные варианты тактики действий сил охраны; временные параметры, связанные с преодолением нарушителем физических барьеров; время реакции сил охраны.

Функционирование системы обеспечения безопасности аэропорта организовано с учётом конфликта интересов «система безопасности – нарушитель». Эта конфликтная ситуация происходит в условиях неопределённости, связанной в первую очередь с полным или частичным отсутствием информации о целях потенциального нарушителя, его стратегии и тактике.

Специфика работы САБ требует от сотрудников не столько теоретических знаний, сколько практических навыков и умений, позволяющих своевременно распознавать угрозы в адрес объектов воздушного транспорта и предпринимать ответные меры. При этом правильность принятия решений, быстрота и эффективность действий напрямую зависят от уровня подготовки специалиста САБ. Для выработки этих навыков применяется система обучения с использованием компьютерных технологий. Данная система может представлять собой комбинацию компьютерных учебных занятий с моделированием реальной ситуации.

В этом случае целесообразно иметь возможность получать данные о развитии чрезвычайных ситуаций на объектах транспортной инфраструктуры (ОТИ) и транспортных средствах (ТС) аэропорта для принятия превентивных мер защиты. Эти данные могут быть получены по результатам моделирования поведения систем, обладающих при возникновении АНВ рядом трудно формализуемых характеристик.

В настоящее время при моделировании сложных организационно-технических систем всё большее применение находят сети Петри [1–5].

Сеть Петри – инструмент для моделирования динамических дискретных асинхронных систем. Теория сетей Петри позволяет моделировать систему математическим представлением её в виде двудольного ориентированного мультиграфа, анализ которого помогает получить важную информацию о её структуре и динамическом поведении.

Существуют три эквивалентных способа задания сети Петри: аналитический, графический и матричный.

Построение моделей систем в виде сетей Петри связано с выполнением ряда действий, таких как [6]:

- описание моделируемых процессов (явлений), совершающихся в системе, множеством событий и условий, которыми эти события определяются, а также причинно-следственными отношениями, устанавливаемыми на множестве «события – условия»;
- определение событий – действий, последовательность наступления которых управляется состояниями системы и которые задаются множеством условий, причём только их выполнение обеспечивает возможность наступления событий, а наступление события обеспечивает выполнение других условий.

В сетях Петри условия отображаются позициями, а события – переходами. Последовательная реализация событий в моделируемой системе отображается в сети Петри в виде последовательного срабатывания её переходов. Элементами сети Петри являются позиции, переходы, дуги и фишки. Дуги соединяют только вершины противоположных типов: позицию с переходом и переход с позицией. Фишки находятся внутри позиций и при срабатывании переходов перемещаются в сети. Переход разрешён (возбуждён), если в каждой из его входных позиций находятся фишки в количестве не меньше, чем число дуг, соединяющих эту позицию с данным переходом. Из множества разрешённых срабатывает произвольный переход. Для управления последовательностью срабатывания переходов вводятся приоритеты. При срабатывании перехода из всех его входных позиций удаляются фишки с учётом кратности дуг и помещаются в выходные позиции (с учётом кратности дуг). Срабатывание перехода происходит мгновенно.

Сеть Петри описывает множество различных допустимых вариантов поведения моделируемых систем.

Построение диаграммы состояний сети позволяет выявить наличие возможных тупиков сети, то есть убедиться, что структура сети не содержит элементов, не участвующих в её работе.

Математический аппарат сетей Петри и их применение в моделировании подробно описаны в [6–9].

Построение модели с использованием сетей Петри

Построим сеть Петри, моделирующую процесс возникновения чрезвычайной ситуации, связанной с попыткой реализации АНВ на ОТИ и ТС в аэропорту (рис. 1) и его нейтрализацию сотрудниками САБ (рис. 2). Аналитически данная маркированная сеть Петри может быть представлена в следующем виде [1, 2]:

$$C = (P, T, I, O, H, M_0),$$

где P – непустое конечное множество позиций; T – непустое конечное множество переходов (множества P и T не пересекаются: $P \cap T = \emptyset$); $I: P \times T \rightarrow N_0$ – входная функция переходов; $O: P \times T \rightarrow N_0$ – 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.

Для удобства представления данной сети Петри используется матричный подход, который основывается на её описании матрицами D^- , D^+ и D [3].

Матрица D^- представляет входную функцию сети (матрица инцидентий дуг, входящих в переходы), матрица D^+ – выходную функцию сети (матрица инцидентий дуг, выходящих из переходов), а D – матрица изменений (матрица инцидентий сети Петри). Каждая матрица имеет m строк (по одной на переход) и n столбцов (по одному на позицию). Для данной сети Петри матрицы D^- и D^+ представлены в табл. 1 и табл. 2.

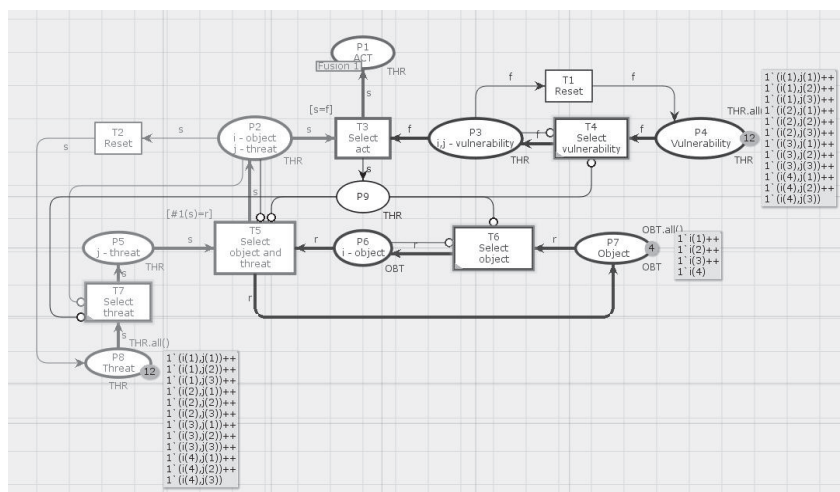


Рис. 1. Модель процесса возможной реализации АНВ на ОТИ и ТС

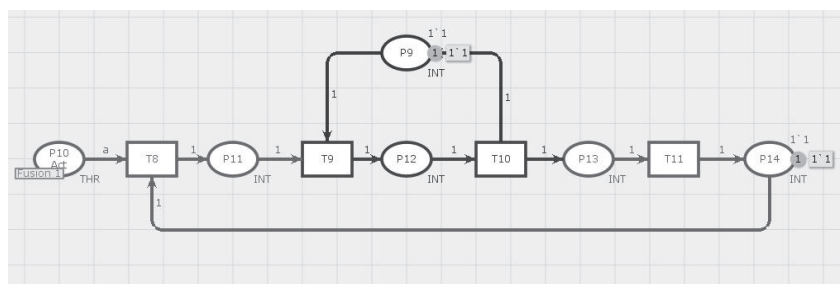


Рис. 2. Модель процесса нейтрализации АНВ

Таблица 1

Матрица, представляющая входную функцию сети Петри: 0 – дуга отсутствует;
1 – наличие дуги; -1 – наличие ингибиторной дуги

[illegible]

Таблица 2

Матрица, представляющая выходную функцию сети Петри: 0 – дуга отсутствует; 1 – наличие дуги

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
T1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
T3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
T4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T5	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
T6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
T7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
T9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
T10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
T11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Матрица инцидентий сети Петри определяется выражением:

$$D = D^+ - D^-.$$

Элементы матриц D^- , D^+ и D определяются по формулам:

$$d_{ij}^- = I(p_i, t_j); \quad d_{ij}^+ = O(t_j, p_i); \quad d_{ij} = O(t_j, p_i) - I(p_i, t_j),$$

где значение $I(p_i, t_j)$ определяется кратностью дуг от позиции p_i до перехода t_j , а значение функции $O(t_j, p_i)$ определяется кратностью дуг от перехода t_j до позиции p_i .

Зная исходную маркировку m_0 сети и вектор запуска переходов \mathbf{x} , число элементов в котором равно числу переходов, а значение каждого элемента определяется количеством запусков соответствующего перехода в процессе выполнения сети, можно определить результирующую маркировку m_1 по формуле [3]:

$$m_1 = m_0 + \mathbf{x} \times D.$$

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. 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. 1) моделирует процесс возникновения чрезвычайной ситуации, связанной с попыткой реализации АНВ на ОТИ и ТС в аэропорту;
- вторая сеть Петри (рис. 2) моделирует процесс нейтрализации АНВ силами сотрудников САБ.

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

Действия нарушителя по попытке реализации АНВ сводятся к следующему:

- выбрать объект для осуществления АНВ;
- выбрать вид АНВ для данного ОТИ или ТС;
- провести соответствующую подготовку;
- выбрать время и начать реализацию.

При этом действия системы защиты заключаются в необходимости находиться в постоянной готовности к отражению потенциально возможных на данном объекте АНВ.

АНВ становится возможным, если существует его угроза и при этом есть уязвимость в системе безопасности ОТИ к этой угрозе.

Задавая значения n – количество критических объектов в аэропорту; m – количество возможных потенциальных угроз для этих объектов в области меню во вкладке настройки программы, получаем в позиции P7 (рис. 1) соответственно количество критических элементов, а в позициях P8 все возможные угрозы и в P4 – все возможные уязвимости к ним.

Переходы срабатывают произвольным образом, что соответствует случайному по времени характеру существования угрозы для конкретного ОТИ и наличию возможной уязвимости к нему.

Как только произойдёт совпадение во времени наличия угрозы конкретному ОТИ и существования уязвимости на нём, для этой угрозы может начаться АНВ (позиция P1 рис. 1).

Далее (рис. 2) при готовности сотрудников САБ к отражению АНВ (наличие фишки в позиции P9) начнётся нейтрализация АНВ. И после её окончания система перейдёт в исходное состояние.

Задавая время выполнения операций при моделировании, используя атрибут «время задержки» перехода, можно анализировать временные характеристики процесса нейтрализации АНВ.

Заключение

В статье представлена математическая модель процесса вероятной реализации АНВ в аэропорту и его нейтрализации сотрудниками САБ, выполненная с помощью аппарата сетей Петри и реализованная в специальной моделирующей среде *CPN Tools*. Разработанная модель позволяет осуществлять адекватное пространственно-временное отображение развития ситуации на ОТИ или ТС, связанной с действиями нарушителя, направленными на реализацию АНВ и нанесение ущерба аэропорту.

Модель позволяет определять возможные варианты развития событий, связанных с реализацией АНВ на ОТИ или ТС аэропорта, в том числе с учётом его характерных особенностей. Поэтому в ходе подготовки персонала к отражению подобных атак необходимо целенаправленно готовить сотрудников службы безопасности в том числе и к неожиданным вариантам развития событий.

Направлением дальнейших исследований в этой области будет являться применение нечётких сетей Петри для моделирования процессов обеспечения авиационной безопасности аэропорта путём их детализации.

Созданию разнообразных связей между вершинами сети Петри может способствовать метод морфологического синтеза, позволяющий найти и систематизировать все возможные способы построения сети, имеющей данное функциональное назначение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dejan Gradisar, Gasper Music. Petri-net modelling for batch production, *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, vol. 46, no. 9, pp. 1566–1571.
2. Zelin Li, Shihai Wang, Tingdi Zhao, Bin Liu. A hazard analysis via an improved timed colored petri net with time-space coupling safety constraint, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, vol. 29, no. 4, pp. 1027–1041.
3. Perica Strbac, Gradimir V. Milovanovic. Upgraded Petri net model and analysis of adaptive and static arithmetic coding, *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, vol. 58, no. 7-8, pp. 1548–1562.
4. Kabashkin Igor. Modelling of Regional Transit Multimodal Transport Accessibility with Petri Net Simulation, *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 77, pp. 151–157.
5. Ondrej Nyvlt, Stein Haugen, Lukas Ferkl. Complex accident scenarios modelled and analysed by Stochastic Petri Nets, *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, vol. 142, pp. 539–555.
6. Блюмин С. Л., Шмырин А. М., Седых И. А., Филоненко В. Ю. Окрестностное моделирование сетей Петри: монография. Липецк: ЛЭГИ, 2010. 124 с.
7. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. Москва: Мир, 1984. 264 с.
8. Котов В. Е. Сети Петри. Москва: Наука, 1984. 160 с.
9. Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications, *Proceedings of IEEE*, 1989, vol. 77, no. 4, pp. 541–580.
10. 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.

References

1. Dejan Gradisar, Gasper Music. Petri-net modelling for batch production, *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, vol. 46, no. 9, pp. 1566–1571.
2. Zelin Li, Shihai Wang, Tingdi Zhao, Bin Liu. A hazard analysis via an improved timed colored petri net with time-space coupling safety constraint, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, vol. 29, no. 4, pp. 1027–1041.
3. Perica Strbac, Gradimir V. Milovanovic. Upgraded Petri net model and analysis of adaptive and static arithmetic coding, *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, vol. 58, no. 7-8, pp. 1548–1562.
4. Kabashkin Igor. Modelling of Regional Transit Multimodal Transport Accessibility with Petri Net Simulation, *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 77, pp. 151–157.
5. Ondrej Nyvlt, Stein Haugen, Lukas Ferkl. Complex accident scenarios modelled and analysed by Stochastic Petri Nets, *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, vol. 142, pp. 539–555.
6. Blyumin S. L., Shmyrin A. M., Sedykh I. A., Filonenko V. Yu. *Okrestnostnoe modelirovanie setei Petri: monografiya [Neighboring modeling of Petri nets: monograph]*, Lipetsk, LEGI publ., 2010, 124 p. (In Russ.)
7. Piterson J. *Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem [Petri net theory and the modeling of systems]*, Moscow, Mir publ., 1984, 264 p. (In Russ.)
8. Kotov V. E. *Seti Petri [Petri nets]*, Moscow, Nauka publ., 1984, 160 p. (In Russ.)
9. Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications, *Proceedings of IEEE*, 1989, vol. 77, no. 4, pp. 541–580.
10. Zubkov B. V., Yudaev V. V., Verbitskiy Yu. A. The approach to the assessment of the effectiveness of the aviation security service of airlines using Petri nets, *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 218(8), pp. 71–75. (In Russ.)

Информация об авторах

Юдаев Вячеслав Владимирович, старший преподаватель кафедры, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия, yvv2210@mail.ru

Гладких Анатолий Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия, a_gladkikh@mail.ru

Уласюк Татьяна Георгиевна, старший преподаватель, аспирант кафедры, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия, tgu-7@yandex.ru

Authors information

Yudaev Vyacheslav V., Senior Lecturer at the Department of Aviation Security, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, oabuvauga@mail.ru

Gladkikh Anatolij A., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor at the Department, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, a_gladkikh@mail.ru

Ulasjuk Tatyana G., Senior Lecturer, Postgraduate Student at the Department, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, tgu-7@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29.01.2023; одобрена после рецензирования 28.04.2023; принята к публикации 12.05.2023.

The article was submitted 29.01.2023; approved after reviewing 28.04.2023; accepted for publication 12.05.2023.