

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКИХ РАСКРАШЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Линник Иван Иванович

канд. техн. наук, доц., доцент кафедры информатики и информационных технологий

Линник Елена Петровна

канд. физ.-мат. наук, доц., заведующая кафедрой математики, теории и методики

обучения математике

Гуманитарно-педагогическая академия (филиал) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского» в г. Ялте

Линник Вадим Иванович

преподаватель

Санкт-Петербургское ГБПОУ "Колледж электроники и приборостроения"

Тамаргазин Александр Анатольевич

заведующий кафедрой технологии аэропортов

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

Аннотация. На базе математического аппарата нечётких раскрашенных сетей Петри разработан метод идентификации воздушных судов в контролируемом воздушном пространстве позволяющий снизить зависимость размерности нечёткой сетевой модели верификации соответствующего программного обеспечения от размерности динамических взаимодействующих процессов предметной области. Предложена база нечётких продукционных правил нечёткой логической системы классификации воздушных объектов в процессе контроля использования воздушного пространства, а также разработан обобщённый алгоритм реализации этих правил. Структурно нечёткие продукционные правила при этом отвечают правилам нечёткой логической модели Sugeno первого порядка. Такое представление процесса классификации воздушных объектов с использованием нечёткой логической модели позволяет учесть как нестохастичный, так и субъективный характер процесса принятия решения оператором. Разработанный обобщённый алгоритм реализации нечётких продукционных правил в рамках модели Sugeno первого порядка является основой для создания программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов.

Ключевые слова: Классификация воздушных объектов, беспилотные летательные аппараты, раскрашенные сети Петри.

Abstract. Based on mathematical methods of fuzzy colored Petri nets proposed is a method of airborne vehicles' identification in controlled airspace allowing to reduce the dependence of the degree of fuzzy net model of the corresponding software's verification on the degree of dynamic interacting processes in the subject area. Proposed are the data of fuzzy rule-oriented requirements of the fuzzy logical system of airborne vehicles' classification in the process of airspace control. Developed is a unified algorithm of these requirements' implementation. Further, the fuzzy rule-oriented requirements are in structural conformity with the requirements of the Sugeno fuzzy logical system of the first-order. This view of the airborne vehicles' classification process using the fuzzy logical system allows considering both the non-stochastic and subjective nature of operators' decision-making. The developed unified algorithm of the fuzzy rule-oriented requirements' implementation within the Sugeno system of the first-order is the basis for the software of the fuzzy logical system of airborne vehicles' classification.

Keywords: Airborne vehicles' identification, colored Petri nets.

Введение. Ежедневно множество промышленных объектов, таких как аэропорты, нефтеперерабатывающие заводы, атомные электростанции, линии электропередач и газопроводы подвергаются атаке с использованием различных типов воздушных объектов, в первую очередь беспилотных летательных аппаратов. В тоже время те же беспилотные летательные аппараты широко используются с целью мониторинга и защиты этих промышленных объектов. Поэтому необходимы технические средства, позволяющие в автоматическом или автоматизированном режиме классифицировать угрозу, исходящую от конкретного воздушного объекта в заданной зоне ответственности при использовании единой информационной системы управления технологическими процессами [1].

Одним из методов, который может быть использован для создания программного обеспечения таких технических средств контроля воздушного пространства, может быть метод интерпретированных нечётких сетей Петри. Этот метод показал возможность решения задач разного класса, и к тому же в нём реализуются возможности адаптации к особенностям процесса конкретной предметной области.

Как показано в [2], в общем случае процесс верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов можно рассматривать как процесс исследования динамических взаимодействующих процессов. Причём известны отдельные теоретические и практические результаты применения сетей Петри для исследования динамических взаимодействующих процессов [3].

Тем не менее, с одной стороны, хотя существующие подходы к построению раскрашенных сетей Петри и нечётких раскрашенных сетей Петри имеют широкий диапазон применения, но направления их внедрение в современные разработки без дальнейшего их развития затруднено. С другой стороны, отсутствуют методы непосредственной верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов в процессе контроля воздушного пространства. Это стало отправным моментом для использования нового класса расширенных нечётких раскрашенных сетей Петри, которые не имеют указанных выше недостатков и позволяют верифицировать программное обеспечение нечёткой логической системы классификации. Эти сети Петри характеризуются следующими свойствами [4]:

- возможностью создания нечётких сетевых моделей, которые характеризуются естественной интерпретацией, простотой описания и моделирование взаимодействующих нечётких динамических процессов, представленных на множестве отношений «условие-действие» с учётом множества реальных параметров, характеристик, показателей и ограничений предметной области;

- адаптацией к классам задач и предметной области при решении комплекса поставленных задач верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации;

- решением комплекса поставленных задач как единой проблемы создания моделей, критериев, методов и эффективных инструментальных средств с использованием современных информационных технологий.

Изложение основного материала.

В общем случае, раскрашенные сети Петри определяются как:

$$S = \langle P, T, F, V, K, C, M_0 \rangle, \quad (1)$$

где P – множество позиций; T – множество переходов; $F: (P \times T) \cup (T \times P)$ – функция инцидентностей; C – функция цвета маркера; V – условия срабатывания переходов в зависимости от цвета маркера; K – ёмкость маркеров в позициях с учётом C ; M_0 – вектор начальной маркировки.

Сетевая модель описания взаимодействующих процессов, построенная на основе раскрашенных сетей Петри, имеет меньшую размерность, чем модель на основе

классических сетей Петри. Это объясняется тем, что каждый цвет $c_i \in C$, $\forall i \in I$ несёт информацию о некотором, только для него характерном условии, а в некоторой позиции может находиться несколько маркеров разных цветов. Классическими сетями Петри будем считать ординарные сети Петри [5, 6, 7] без любых расширений.

Под нечёткой раскрашенной сетью Петри понимается сеть:

$$S'_C(f) = \langle P', T', F'(f), M'_0(f), M'_C(f), \dots \\ \dots L\{x_u\}, u \in U, C', V', K' \rangle, \quad (2)$$

где P' – множество нечётких позиций; T' – множество нечётких переходов; $L\{x_u\}$, $u \in U$ – предикат, который отнесён на модели к множества позиций, переходов, функции инцидентности в пространственных состояниях нечётких взаимодействующих процессов и определяет дополнительные условия выполнения переходов; $F'(f) = (P' \times T') \cup (T' \times P')$ – нечёткая функция инцидентностей; C' – функция цвета каждого из маркеров $M'(p_i)$ для позиций сети; V' – условия срабатывания переходов в зависимости от цвета маркера; K' – ёмкость маркеров в позициях с учётом C' ; $M'_0(f)$ – вектор начальной маркировки; $M'_C(f)$ – вектор текущей маркировки.

Введение в модель (2) предиката $L\{x_u\}$, $u \in U$ и свойств C' , V' , K' существенным образом увеличивает возможности модели в сравнении с существующими подходами. Введение свойств цвета существенным образом снижает мощность больших множеств P' , T' , увеличивается разрежённость матрицы функции инцидентности $F'(f)$ и матрицы инцидентности $H'(f)$. В свою очередь, разрежённость функции инцидентности $F'(f)$ и матрицы инцидентности $H'(f)$ может быть представлена как:

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x''_{ij}(k_0) + y'_{ij}(k_0))}{T'P'} \quad (3)$$

где

$$x'_{ij}(k_0) = \begin{cases} 1, & \text{if } x'_{ij}(k_0) \neq 0, \\ 0, & \text{if } x'_{ij}(k_0) = 0, \end{cases}$$

$$y'_{ij}(k_0) = \begin{cases} 1, & \text{if } y'_{ij}(k_0) \neq 0, \\ 0, & \text{if } y'_{ij}(k_0) = 0. \end{cases}$$

Если заданная сеть $S'_C(f)$ и определённые векторы $M'_0(f)$ и $M'_C(f)$, то метка $M'_b(p'_j)$ b -го цвета с $C_{bj} \in \{C_{bj}\}$, $b \in B$, $j \in J$ маркировки позиции $p'_j \in P'$ определяет существование b -го ресурса, заданного на множестве ресурсов $R_b \in \{R_b\}$, $b \in B$ моделированных процессов предметной области. При этом значение $C = \{C_\alpha\}$, $\alpha \in A$, где α – некоторый цвет с A , и объём K маркеров для некоторой позиции

$p'_j \in P'$ связаны так: $K_{p'_j} = |C_{\alpha p'_j}|$. Обоснование этого положение выходит из сути и интерпретации метки $M_\alpha(p'_j) = 1$ цвета α . Функция $C = \{C_\alpha\}$, $\alpha \in A$ определяет, кроме собственно цвета в данном случае, также и ёмкость меток каждого цвета в позициях $p'_j \in P'$ сети $S'_C(f)$.

Наличие некоторого множества цветных маркеров $|B|$ в позициях сети $S'_C(f)$ требует определения условий разрешённости её переходов. Некоторый переход $t'_i \in T'$ сети $S'_C(f)$ разрешён, если для него справедливо:

$$\begin{aligned}
& R_t(S'_c(f)) = t'_i \in T' \mid \mu_t(k_0) \geq \mu_t(k_0)^* \text{ and} \\
& \forall p'_i \in \{p'_i(i_n)\} \mid \mu_{p'_i}(k_0) \geq \mu_{p'_i}(k_0)^* \text{ and} \\
& \left(\forall M'_{c_\alpha}(p'_j) \in M'_c(f) \mid M'(p'_j) > 1 \text{ and } z_{p'_j}(k_0) \geq z_{p'_j}(k_0)^* \right) \text{ and} \\
& x_{ij}(k_0) \geq x_{ij}(k_0)^* \text{ and } L = \text{true and } V' = \text{true}
\end{aligned}$$

где $M'_{c_\alpha}(p'_j)$ – маркер цвета α в позиции p'_j ; $V = V(K_{p'_j \in \{p'_i(i_n)\}}, C_{ap'_j \in \{p'_i(i_n)\}})$ – условие срабатывания перехода в зависимости от цвета и ёмкости маркеров.

Предлагаемая модель на основе нечёткой раскрашенной сети Петри $S'_c(f)$ есть довольно эффективной в условиях решения комплекса практических задач, в том числе и при верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов в процессе контроля воздушного пространства. Представление взаимодействующих процессов рассматривается для случаев:

1. Процесс выполняется при наличии ровно одного входного условия и ровно одного выходного условия

$$\exists t'_i \in T' \mid |\{p'_i(in)\}| = |\{p'_i(out)\}| = 1; \quad (4)$$

2. Процесс выполняется при наличии нескольких, не равных одной, входного условия и ровно одного выходного условия

$$\exists t'_i \in T' \mid |\{p'_i(in)\}| > 1 \text{ and } |\{p'_i(out)\}| = 1; \quad (5)$$

3. Процесс выполняется при наличии ровно одного входного условия и нескольких, неравных одному, выходных условий

$$\exists t'_i \in T' \mid |\{p'_i(in)\}| = 1 \text{ and } |\{p'_i(out)\}| > 1; \quad (6)$$

4. Некоторое условие выполнения процесса имеет несколько, не равных одному, входных процессов и ровно один выходному процессу

$$\exists p'_i \in P' \mid |\{t'_i(in)\}| > 1 \text{ and } |\{t'_i(out)\}| = 1; \quad (7)$$

5. Некоторое условие выполнения процесса имеет ровно один входной процесс и несколько, не равных одному, выходных процессов

$$\exists p'_i \in P' \mid |\{t'_i(in)\}| = 1 \text{ and } |\{t'_i(out)\}| > 1; \quad (8)$$

6. Некоторое условие имеет только ровно один выходной процесс

$$\exists p'_i \in P' \mid |\{t'_i(in)\}| = 0 \text{ and } |\{t'_i(out)\}| = 1; \quad (9)$$

7. Некоторое условие имеет только ровно один входной процесс

$$\exists p'_i \in P' \mid |\{t'_i(in)\}| = 1 \text{ and } |\{t'_i(out)\}| = 0; \quad (10)$$

8. Процесс выполняется при наличии нескольких, не равных одному, входных условий и нескольких, не равных одному, выходных условий

$$\exists t'_i \in T' \mid |\{p'_i(in)\}| > 1 \text{ and } |\{p'_i(out)\}| > 1; \quad (11)$$

9. Некоторое условие выполнения процесса имеет несколько, не равных одному, входных процессов и несколько, не равных одному, выходных процессов

$$\exists p'_i \in P' \mid |\{t'_i(in)\}| > 1 \text{ and } |\{t'_i(out)\}| > 1; \quad (12)$$

где $\{t'_j(\text{in})\}$ – множество входных переходов позиции p'_j ; $\{t'_j(\text{out})\}$ – множество выходных переходов позиции p'_j .

Выражение (11) может быть представлено последовательным соединением выражений (5) и (6); выражение (12) – последовательным соединением выражений (7) и (8).

Для каждого из выражений (4) - (8) определяются условия разрешённости переходов и условия маркировки позиций моделей.

Учитывая, что выражения (4) - (6) отличаются только количеством входных $|\{p'_i(\text{in})\}|$ и (или) исходных позиций $|\{p'_i(\text{out})\}|$ данного перехода t'_j , то для них справедливые соответствующие условия

$$\begin{aligned} t'_i \in T' : \mu_{t'_i}(k_0) \geq \mu_{t'_i}(k_0)^* \text{ and } \forall p'_j \in \{p'_i(\text{in})\} \\ \left| p'_j : \mu_{p'_j}(k_0) \geq \mu_{p'_j}(k_0)^* \text{ and } \right. \\ \left. \forall M'(p'_j) \in M'(f) \middle| M'(p'_j) \geq 1 \text{ and } \right. \\ z_{p'_j}(k_0) \geq z_{p'_j}(k_0)^* \text{ and } \\ x_{ij}(k_0) \geq x_{ij}(k_0)^* \text{ and } L = \text{true} \end{aligned} \quad (13)$$

где $\mu_{t'_i}(k_0)^*$, $\mu_{p'_i}(k_0)^*$, $z_{p'_i}(k_0)^*$, $x_{ij}(k_0)^*$ – ограничения на значение соответствующих функций принадлежности, k_0 – некоторое значение переменной k , которая определяет конкретное, исходя из экспертных оценок о предметной области, значениях соответствующей функции принадлежности.

Учитывая, что выражения (7) - (10) отличаются количеством входных $|\{t'_j(\text{in})\}|$ и (или) выходных $|\{t'_j(\text{out})\}|$ переходов данной позиции p'_j , то для переходов $\{t'_i\}$, которые входят в соответствующее выражение с (7) - (10), также справедливы приведенные выше условия их разрешённости.

Взаимодействующие динамические нечёткие процессы, которые отвечают верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов в процессе контроля воздушного пространства, могут быть формально представленные в виде аналитических представлений, логики предикатов, которые содержат логические, включая нечёткие, операции – И, ИЛИ, НЕ, их производные и логические функции; графическое представление, например, в виде граф-схем алгоритмов, включая нечёткие правила продукций на основе if/then отношений, которые содержат в общем случае и нечёткие представления.

Таким образом, при описании взаимодействующих динамических нечётких процессов, представленных логикой предикатов, необходимо по крайней мере представить с использованием нечёткой раскрашенной сети Петри логические операции И, ИЛИ, НЕ и функциями принадлежности

$$\mu_{I'i}, i \in I$$

компонентов модели верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов.

Операция $\langle \text{and } a_i \rangle$, $i \in I$ может быть представлена выражением (5). Это положение основано на свойстве разрешённости перехода t'_i выражения (5) при маркировке всех входных позиций $p'_j \in \{p'_i(\text{in})\}$ фрагмента. Операция $\langle \text{or } a_i \rangle$, $i \in I$ может быть представлена фрагментом модели (7). Это положение основано на свойстве маркировки позиции p'_j фрагмента (7) при выполнении по крайней мере одного перехода $t'_i \in \{t'_j(\text{in})\}$ позиции p'_j фрагмента.

В этой интерпретации в фрагменте (7) возникает возможность нарушения безопасности и возникновение конфликта, который необходимо учитывать в практической реализации процесса верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов.

Операция НЕ может быть представлена введением в выражение (4) ингибиторной дуги и модификации разрешённости его перехода так, что он будет разрешён если справедливо выражение

$$\exists t'_i \in T' \parallel |p'_i(in)| = |p'_i(out)| = 1 \text{ and } (M'(p'_j) = 0 \text{ or } z_{p'_j}(k_0) < z_{p'_j}(k_0)^*) \quad (14)$$

Это положение основано на свойстве ингибиторных дуг, когда разрешённости перехода t'_i модифицированного фрагмента (4) возможна при отсутствии маркировки входной позиции $p'_j \in \{p'_i(in)\}$ фрагмента и/или справедливости выражения (13).

В случае задачи взаимодействующих динамических нечётких процессов, сложных процедур в виде графического представления алгоритмов, необходимо выделить и описать такие элементы нечёткой логической системы классификации воздушных объектов: вычислительный процесс, процесс управления, принятие решений; развитие процессов по логическому условию; развитие процессов по выполнению по крайней мере одного из предыдущих процессов; распараллеливание процессов; развитие процессов после окончания всех предыдущих; начало развития процессов; получение искомого результата.

Отдельные фрагменты алгоритмов, например, типа «обусловленный процесс» или вывод результатов на внешнее устройство и некоторые другие, могут без потери информативности и адекватности их отображения быть представлены приведенными выше выражениями.

Основные положения, которые определяют интерпретацию фрагментов модели, формулируются в таком виде:

- вычислительный процесс, процесс управления, принятие решений Γ_i может быть представленный в модели выражением (4);
- развитие нечётких процессов по выполнению логического условия в модели может реализоваться выражением (9);
- развитие процессов по выполнению по крайней мере одного из предыдущих процессов в модели может быть реализовано выражением (10);
- процедура распараллеливания процессов $\{\Gamma_i\}$ может быть представлена выражением (6) модели;
- процедура развития процессов $\{\Gamma_i\}$ после окончания всех предыдущих процессов может быть представлена выражением (5);
- процедуры начала развития процессов и получение искомого результата могут быть представлены соответственно выражениями (9) и (10).

Процедуры представления правил продукций вида if/then определяются выражениями (4) - (10) модели. Если фрагменты базовой задачи заданы правилами продукций вида if/then, то очевидно, что правила продукций могут быть представленными выражениями модели $S'(f)$, $S'(c(f))$, аналогично представлению взаимодействующих процессов предикатами, логическими функциями на основе логических операций.

Рассмотрим структуру правил продукции в чётком представлении знаний

$$\text{if } A \text{ and } B \text{ and } C \text{ then } D \quad (15)$$

В вербальном изложении (18) может быть представлено так: если справедливо А

и В и С, тогда выполнить действие D. Или на языке булевой логики:

$$D = true | A \text{ and } B \text{ and } C = true \quad (16)$$

Для выражений типа (16) уже были найдены решения относительно представления логических операций соответствующими выражениями с (4) - (8) нечётких сетевых моделей $S'(f)$, $S'c(f)$. Можно показать справедливость соответствующих решений для правил продукций, что содержат операции ИЛИ, НЕ и их производные.

Свойства нечёткости как компонент предикатов, так и графического представления алгоритмов, а также правил продукций полностью определяются соответствующими функциями принадлежности. Аналогично (15), (16) в нечётком представлении может быть определено так

$$\begin{aligned} & \text{if } A' \text{ is } \mu_{A'}(k) \text{ and } B' \text{ is } \mu_{B'}(k) \text{ and} \\ & C' \text{ is } \mu_{C'}(k) \text{ then } D' \text{ is } \mu_{D'}(k) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} D' = true & | ((A' \text{ and } B' \text{ and } C') = true) \text{ and} \\ & (\mu_{A'}(k_0) \geq \mu_{A'}(k_0)^*) \text{ and} \\ & (\mu_{B'}(k_0) \geq \mu_{B'}(k_0)^*) \text{ and } (\mu_{C'}(k_0) \geq \mu_{C'}(k_0)^*) \text{ and} \\ & (\mu_{D'}(k_0) \geq \mu_{D'}(k_0)^*) \end{aligned} \quad (18)$$

где $\mu_{A'}(k_0)^*$, $\mu_{B'}(k_0)^*$, $\mu_{C'}(k_0)^*$, $\mu_{D'}(k_0)^*$ – допустимые значения соответствующих функций принадлежности.

Функции принадлежности $\{\mu_{I_i}(k)\}$ множества процессов $\{\Gamma_i\}$, определяющие условия и действия предметной области, отображаются на множестве нечётких позиций $\{p'_j\}$ и нечётких переходов $\{t'_i\}$ в пространственные состояния модели $S'(f)$, $S'c(f)$. Это связано с тем, что нечёткая модель $S'(f)$, $S'c(f)$ отображает нечёткие процессы предметной области. Так, для представления фрагмента некоторых нечётких знаний правилом продукции, которое содержит нечёткие условия и нечёткие действия, можно записать в виде (17).

Процесс классификации воздушного объекта рассматривается как установления принадлежности данного воздушного объекта $x \in X$ к заранее заданному классу воздушных объектов согласно отношению:

$$F : X \rightarrow \{K_i^\varepsilon\}, \quad (19)$$

где X – множество всех выявленных воздушных объектов; x – воздушный объект с номером N_i^ε , $i = \overline{1, L}$, L – количество выявленных воздушных объектов; K_i^ε – класс воздушного объекта, $i = \overline{1, 10}$.

Формально заранее заданные классы воздушных объектов задаются в виде множества $\{K_i^{AO}\}$, элементами которой есть:

– класс K_1^ε "воздушный объект не определён" – определяется автоматически или задаётся автоматизировано;

– класс K_2^ε "воздушный объект – полёт по заявке" – определяется автоматически или задаётся автоматизировано;

- класс K_3^ε "воздушный объект – нарушитель режима полётов" – определяется автоматически или задаётся автоматизировано;
- класс K_4^ε "воздушный объект без сигнала опознавания" – определяется автоматически или задаётся автоматизировано;
- класс K_5^ε "воздушный объект с сигналом опознавания" – определяется автоматически или задаётся автоматизировано;
- класс K_6^ε "воздушный объект постановщик помех" – определяется автоматически или задаётся автоматизировано;
- класс K_7^ε "воздушный объект – свой боевой" – задаётся автоматизировано;
- класс K_8^ε "воздушный объект – контрольный" – задаётся автоматизировано;
- класс K_9^ε "воздушный объект – иностранный нарушитель границы" – задаётся автоматизировано;
- класс K_{10}^ε "воздушный объект – противник" – задаётся автоматизировано.

Значение множества характеристик воздушного объекта $\{C_i^\varepsilon\}$ и классы воздушных объектов множества $\{K_i^\varepsilon\}$ находятся между собой в бинарном отношении (19), что задаётся соответствующей матрицей отношений

$$\rho = [d_{ji}]_{m \times n}, \quad (20)$$

где m – количество значений характеристик воздушных объектов; n – количество классов воздушных объектов.

За элементы множества $\{C_i^\varepsilon\}$ для классификации воздушного объекта рассматриваются такие его признаки:

- признак определения государственной принадлежности C_1^ε ;
- признак корреляции плана полёта C_2^ε ;
- признак нарушения режима полётов C_3^ε ;
- признак сопровождения траектории триангуляционным методом C_4^ε .

Значение признаков C_1^ε , C_2^ε , C_4^ε определяются по результатам обобщения трассовой информации о воздушном объекте и являются лингвистическими переменными (ЛП) в сроках нечётких множеств.

Значение признака C_3^ε по умолчанию устанавливается в 0 (нет нарушения) и меняется автоматически на 1 (есть нарушения), если введённый тип нарушения режима полётов для соответствующего воздушного объекта, и есть лингвистические правила в терминах нечётких множеств.

В общем случае, значение признаков C_1^ε , C_2^ε , C_4^ε и C_3^ε являются нечёткими числами, которые описывают термы соответствующих лингвистических правил.

Классификация воздушного объекта выполняется в автоматическом или автоматизированном режиме. Классификация в автоматизированном режиме обеспечивает определение принадлежностей воздушного объекта к таким классам:

- не идентифицирован;
- полёт по заявке;
- нарушитель режима полётов;
- полёт без сигнала опознавания;
- полёт с сигналом опознавания;
- постановщик помех.

Процесс автоматической классификации выполняется согласно таким лингвистически описанным правилам:

- класс "не идентифицирован" присваивается автоматически тем воздушным объектам, у которых признак государственной принадлежности не определён;
- класс "полёт по заявке" присваивается автоматически тем воздушным объектам, которые не нарушают установленного режима полётов и для которых есть корреляция "плана полёта";
- класс «нарушитель режима полётов» присваивается автоматически тем воздушным объектам, которые нарушают установленный режим полётов и для которых есть корреляция "плана полёта". Предыдущая фиксация нарушения (отклонение от маршрута, отклонение от высоты, превышение количественного состава) осуществляется автоматизировано путём введения данного нарушения с пульта введения данных;
- класс «полёт без сигнала опознавания» присваивается автоматически тем воздушным объектам, для которых нет корреляции "плана полёта" и признак государственной принадлежности имеет значение "чужой";
- класс «полёт с сигналом опознавания» присваивается автоматически тем воздушным объектам, для которых нет корреляции «плана полёта» и признак государственной принадлежности имеет значение "свой" или "нейтральный";
- класс «постановщик помех» присваивается автоматически тем воздушным объектам, для которых нет корреляции «плана полёта», признак государственной принадлежности имеет значение "чужой" и траектория полёта обрабатывается с использованием триангуляционного метода.

Автоматизированный режим позволяет оператору изменить принадлежности воздушного объекта к классам из предыдущего перечня, определённую в результате автоматической классификации, а также установить или изменить принадлежности воздушного объекта к таким классам:

- свой;
- контрольный;
- нарушитель государственной границы;
- воздушный противник.

Автоматизированная классификация выполняется согласно условиям выше описанных правил, а также согласно таким правилам:

- класс «свой» присваивается автоматизировано после определения оператором факта взлёта воздушного объекта, выявления и взятия его на сопровождение и по результатам оценки воздушной обстановки, которая отображается на средствах отображения индивидуального и коллективного пользования;
- класс "контрольный" присваивается автоматизировано по решению оператора тем воздушным объектам, которые являются своими и вылетели для обучения, тренировки и т.п.;

– класс «нарушитель государственной границы» присваивается автоматизировано или по решению оператора тем воздушным объектам, для которых нет корреляции "плана полётов", и которые являются иностранными и для которых выявленный факт пересечения государственной границы;

– класс "воздушный противник" присваивается автоматизировано или по решению оператора исходя из воздушной обстановки, которая складывается, в данной зоне контроля воздушного пространства.

Формально правила классификации воздушных объектов, которые определяют матрицу отношений (20), задаются в виде совокупности таких нечётких продукционных правил

$$\text{if } C_1^\varepsilon = 0 \text{ then } x = K_1^\varepsilon ; \quad (21)$$

$$\text{if } C_3^\varepsilon = 0 \text{ and } C_2^\varepsilon = 1 \text{ then } x = K_2^\varepsilon ; \quad (22)$$

$$\text{if } C_3^\varepsilon = 1 \text{ and } C_2^\varepsilon = 1 \text{ then } x = K_3^\varepsilon ; \quad (23)$$

$$\text{if } C_2^\varepsilon = 0 \text{ and } C_1^\varepsilon = 01 \text{ then } x = K_4^\varepsilon ; \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{if } C_2^\varepsilon = 0 \text{ and } (C_1^\varepsilon = 10 \text{ or } C_1^\varepsilon = 11) \\ \text{then } x = K_5^\varepsilon ; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{if } C_2^\varepsilon = 0 \text{ and } C_1^\varepsilon = 01 \text{ and } C_4^\varepsilon = 1 \\ \text{then } x = K_6^\varepsilon ; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\text{if } C_1^{AO} = 10 \text{ and } G^d = G_1^d \text{ then } x = K_7^{AO} ; \quad (27)$$

$$\text{if } C_1^\varepsilon = 10 \text{ and } G^d = G_2^d \text{ then } x = K_8^\varepsilon ; \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \text{if } C_1^\varepsilon = 10 \text{ and } C_2^\varepsilon = 0 \text{ and } G^d = G_3^d \\ \text{then } x = K_9^\varepsilon ; \end{aligned} \quad (29)$$

$$\text{if } C_1^\varepsilon = 01 \text{ and } G^d = G_4^d \text{ then } x = K_{10}^\varepsilon , \quad (30)$$

где

– G_d – признак действия оператора по анализу информации, необходимой для классификации воздушного объекта, и действия за реализацией принятого им решения по классу воздушного объекта, которое формально рассматривается как ЛП в терминах нечётких множеств;

– G_1^d – определение факта взлёта своего воздушного объекта, выявление и взятие его на сопровождение, принятие решения оператором о классе воздушного объекта как "свой";

– G_2^d – определение факта взлёта, выявление и взятие на сопровождение воздушного объекта для обучения, тренировки и т.п. и принятие решения оператором о классе воздушного объекта как "контрольный";

– G_3^d – определение факта пересечения иностранным воздушным объектом государственной границы и принятие решения оператором о классе воздушного объекта как "нарушитель государственной границы";

– G_4^d – принятие решения оператором о классе воздушного объекта как "воздушный противник", исходя из воздушной обстановки, которая складывается в зоне его ответственности.

В общем случае, значения признака действия оператора G_d являются нечёткие числа, которые описывают термы соответствующей лингвистических правил.

В состав непосредственно обобщённого алгоритма реализации нечётких продукционных правил классификации воздушного объекта (результатов нечёткого логического вывода на соответствующей базе правил) входят такие алгоритмы решения частных задач на основе использования механизмов нечёткого логического вывода Sugeno нулевого порядка:

– алгоритм решения частной задачи автоматической классификации воздушного объекта по их характеристикам;

– алгоритм решения частной задачи автоматизированной классификации воздушного объекта по их характеристикам.

Выполнение алгоритма, который реализует нечёткие продукционные правила классификации воздушного объекта (21) - (26), включает такие операции и действия:

– поступает информация о воздушном объекте по результатам обобщения трассовой информации;

– для данного воздушного объекта признак нарушения режима полётов по умолчанию устанавливается в значение «0»;

– анализируется значение признака нарушения государственной границы воздушным объектом;

– если признак нарушения государственной границы не определён, то воздушный объект классифицируется как «неопределенный»;

– если определён признак нарушения государственной границы, то анализируется значение признака корреляции "план-полёта";

– если корреляции "плана полёта" нет, то проверяется введение оператором для данного воздушного объекта нарушение режима полётов;

– если нарушение введено оператором, то для данного воздушного объекта признак нарушения режима полётов по умолчанию устанавливается в «1» и воздушный объект классифицируется как нарушитель режима полётов;

– если нарушение не введено оператором, то воздушный объект классифицируется как полёт по заявке;

– если есть корреляция "плана полёта", то анализируется признак нарушения государственной границы;

– если признак нарушения государственной границы имеет значение «чужой» («01»), то анализируется признак сопровождения траектории его полёта триангуляционным методом;

– если сопровождения траектории воздушного объекта триангуляционным методом нет, то он классифицируется как воздушного объекта без сигнала опознавания;

– если есть сопровождение траектории воздушного объекта триангуляционным методом, то он классифицируется как воздушный объект постановщик помех;

– если признак нарушения государственной границы не имеет значения "01", то воздушный объект классифицируется как воздушный объект с сигналом опознавания; результаты классификации отображаются на мониторе оператора.

Выполнение алгоритма, который реализует нечёткие продукционные правила классификации воздушного объекта (21) – (30), включает такие операции и действия:

- выполняется автоматическая классификация воздушного объекта и одновременно поступает информация по неклассифицированным воздушным объектам по результатам обобщения трассовой информации;
- оператор принимает решение о классификации воздушных объектов, которые не были автоматически классифицированы, или об изменении результатов автоматической классификации;
- выбор класса воздушного объекта при выполнении соответствующих условий согласно правилам классификации воздушного объекта;
- отображение результатов классификации на мониторе оператора.

Выводы. В качестве базового математическим аппаратом для верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов в процессе контроля воздушного пространства были выбраны расширенные нечёткие раскрашенные сети Петри. Этот класс сетей Петри обеспечивает снижение зависимости размерности нечёткой сетевой модели верификации от размерности динамических взаимодействующих процессов предметной области.

Кроме того, была разработана база нечётких продукционных правил нечёткой логической системы классификации воздушных объектов в процессе контроля использования воздушного пространства и обобщённый алгоритм реализации этих правил. Структурно нечёткие продукционные правила отвечают правилам нечёткой логической модели Sugeno первого порядка. Формальное представление процесса классификации воздушных объектов с использованием нечёткой логической модели позволяет учесть нестохастичный и субъективный характер процесса принятия решения оператором контролирующего воздушное пространство. Разработанный обобщённый алгоритм реализации нечётких продукционных правил в рамках модели Sugeno первого порядка является основой для создания программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов.

Рассмотренный подход может быть положен в основу метода верификации программного обеспечения нечёткой логической системы классификации воздушных объектов, который обеспечивает преобразование базы нечётких продукционных правил в осуществимую модель на основе использования нечётких раскрашенных сетей Петри в рамках формальных методов верификации программного обеспечения. Результатом выполнения метода должен стать аналитический отчёт о возможном поведении выполняемой модели и выявления всех возможных классов воздушных объектов, данные о которых поступили в систему управления воздушным движением.

Исследование выполнено при поддержке и финансировании РФФИ, проект № 19-29-06081.

Список литературы:

1. Tamargazin A.A., Linnik I.I. Керування процесом використання єдиного інформаційного поля забезпечення технологічних процесів в аеропорту / Наукоємні технології: Наук. журнал – Київ: НАУ, 2019. – № 4 (44). – С.494-499. DOI: 10.18372/2310-5461.44.14326
2. Linnik I.I., Tamargazin A.A., Linnik E.P. Efficiency of controlling the production system at airports using the single information space for ensuring technological processes. CEUR Workshop Proceedings, 2019, pp.88-99.
3. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. 264 с.
4. Кучеренко Е.В. Нечеткие сетевые модели динамических взаимодействующих

процессов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Харьков, 2003. – 342 с.

5. Lomazova I. A. Nested Petri Nets for Adaptive Process Modeling // Pillars of Computer Science: Essays Dedicated to Boris (Boaz) Trakhtenbrot on the Occasion of His 85th Birthday / Ed. by A. Avron, N. Dershowitz, A. Rabinovich. Springer Berlin Heidelberg, 2008. Vol. 4800 of Lecture Notes in Computer Science. P. 460-474

6. Wolfgang Reisig. Understanding Petri Nets - Modeling Techniques, Analysis Methods, Case Studies. Springer, 2013, 1-230 pp.

7. Jensen K. Coloured Petri nets// Petri Nets: Central Models and Their Properties. W. Brauer, W Reisig, Rosenberg (editor). - New York: Springer - Verlag, 1986.-P. 248-299.

УДК 004.94

**ВЫБОР ВАРИАНТОВ МЕЖМАШИННОГО ОБМЕНА
В КЛАСТЕРЕ ПРИ ДУБЛИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ РЕАЛЬНОГО
ВРЕМЕНИ**

Богатырев Владимир Анатольевич

*д-р техн. наук, проф., профессор кафедры «Безопасность информационных систем»
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения»*

Богатырев Станислав Владимирович

директор по информационным технологиям

Богатырев Анатолий Владимирович

*канд. техн. наук, технический директор
АО «Санкт-Петербургский центр компетенций НЕО»*

Аннотация. При дублировании вычислительного процесса рассмотрены варианты обмена в кластере между дублированными компьютерными узлами через резервированные каналы. Проанализировано влияние вариантов организации обмена при дублировании вычислительного процесса на среднее время ожидания, вероятность своевременной и безошибочной передачи в реальном времени.

Ключевые слова: отказоустойчивость, дублированный компьютер, надежность, резервирование, реальное время, вероятность своевременного обмена.

Abstract. When duplicating the computing process, the exchange options in the cluster between duplicated computer nodes through redundant channels are considered. The influence of the exchange options when duplicating the computing process on the average waiting time, the probability of timely and error-free transmission in real time is analyzed.

Keywords: fault tolerance, duplicate computer, reliability, redundancy, real time, probability of timely exchange

Введение. Для киберфизических систем реального времени ключевыми задачами являются обеспечение высокой надежности и отказоустойчивости при поддержке [1 - 3] своевременности и непрерывности процессов обработки и передачи данных [4 - 6]. Обеспечение высокой отказоустойчивости, надежности, производительности при снижении задержек обслуживания в инфокоммуникационных системах, работающих в составе киберфизических систем [7 - 10], достигается в результате резервирования и консолидации ресурсов, в том числе коммуникационных средств и компьютерных узлов, объединяемых в кластеры [11 - 13]. Для обеспечения непрерывности отказоустойчивого функционирования кластер строится на основе резервированных узлов, в которых вычислители и модули памяти дублируются. В дублированных модулях памяти компьютерных узлов поддерживается репликация данных (результатов вычислений),