

УДК 519.71

Е.И. Кучеренко, Д.Е. Краснокутский

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В НЕЧЕТКОМ ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИИ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

Рассмотрены вопросы анализа адекватности нечетких взаимодействующих процессов объектов, характеризующихся распределенностью и иерархичностью. Предложены критерии и методы выявления свойств достижимости и непротиворечивости, целенаправленной модификации модели, представленной в нечетком пространстве состояний. Впервые предложен метод анализа свойств достижимости и непротиворечивости при взаимодействии нечетких иерархических процессов, включающий прямой и обратный пошаговый целенаправленный анализ нечеткого пространства состояний и структуры модели. Сформулированы рекомендации по практическому применению х положений работы в реальных системах.

**Ключевые слова:** нечеткая модель, нечеткие сети Петри, иерархия, достижимость, непротиворечивость, интеллектуальная система

### Введение

Проблема анализа адекватности во взаимодействии процессов в условиях неопределенности является достаточно исследованной. В частности, в работах [1 – 4] рассмотрены некоторые важные вопросы по теме исследований. Анализ показал, что задачи достижимости и непротиворечивости целей в условиях неопределенности являются одними из главных задач моделирования. Их решения вызывают существенные трудности, важность и сложность их решения значительна. Очевидно, что задача анализа нечетких иерархических и распределенных процессов усугубляется наличием иерархических уровней и влияния свойств нечеткости на развитие процессов.

Существующие подходы, например [2 – 4], учитывая сложность их адаптации до иерархии процессов и моделей, не позволяют в полной мере использовать их в теоретических исследованиях и практических приложениях.

В связи с этим данные исследования являются важными и актуальными, направленными на повышение эффективности и достоверности принимаемых решений в условиях неопределенности.

**Постановка задачи.** Пусть существует множество нечетких процессов [5]

$$\{PR_i^{(S)}\}, \quad i \in I, \quad (1)$$

некоторые из них

$$\{PR_{i(L_e)}^{(S)}\} \subseteq \{PR_i^{(S)}\}, \quad i \in I \quad (2)$$

отображают иерархию при их взаимодействии.

Процессы (1), (2) при целенаправленном взаимодействии на множестве декартова произведения

$$\{PR_k^{(S)}\} \times \{PR_l^{(S)}\} \times \dots \times \{PR_u^{(S)}\}, \quad (3)$$

$$k \in K; \quad l \in L; \quad u \in U; \quad K \subset I; \quad L \subset I; \quad U \subset I,$$

причем, в общем случае для (3) справедливо:

$$K \cap L \cap U = \emptyset,$$

реализуют некоторый комплекс взаимодействующих задач  $T_s$ . Задачи  $T_s$  определены согласно логики функционирования сложного объекта.

Для целей моделирования нечетких процессов (1), (2) в [6] предложены модели анализа состояния сложных объектов. Объекты характеризуются параллельно-последовательным асинхронным взаимодействием, наличием альтернатив при принятии решений на множестве критериев и ограничений, распределенностью и иерархичностью взаимодействующих динамических процессов на множестве (3). Процессы (1), (2) и их взаимодействие (3) развиваются во времени  $\tau$ .

Необходимо предложить и обосновать критерии и методы выявления на сетевых моделях свойств достижимости  $\{Rch(S)\}$ , непротиворечивости  $\{\overline{Cont}(S)\}$  при наличии множества критериев и ограничений.

### Подходы к анализу достижимости и непротиворечивости целей принимаемых решений

Пространство состояний взаимодействующих процессов (1) – (3) определено на множестве

$$\{St_i\}, \quad i \in I. \quad (4)$$

Начальное состояние при развитии процессов определим пространством начальных состояний

$$\{St_i^{(b)}\} \subset \{St_i\}, \quad i \in I. \quad (5)$$

Конечное состояние при развитии процессов определим пространством конечных состояний

$$\{St_i^{(e)}\} \subset \{St_i\}, \quad i \in I, \quad (6)$$

причем

$$\{St_i^{(b)}\} \cap \{St_i^{(e)}\} \neq \emptyset. \quad (7)$$

Сформулируем утверждение, определяющее условия достижимости целей принимаемых решений при условии, что для всех процессов (1) – (3) и пространств состояний значение функций принадлежности

$$\mu_{PR}(k_0) = 1, \mu_{St}(k_0) = 1, \quad (8)$$

где  $k$  – некоторая переменная.

**Утверждение 1.** Если определено множество иерархических уровней  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$ , множество процессов (1) – (3), пространство начальных состояний (5), причем  $\{St_i^{(b)}\} \neq \emptyset$ , и выполняется (8), то цели принимаемых решений достижимы, если при целенаправленном выполнении процессов справедливо:

$$\forall PR_{i(Le)}^{(S)}, PR_{i(Le)}^{(S)} \in \{PR_{i(Le)}^{(S)}\}; i \in I;$$

$$\forall Le_j, Le_j \in \{Le_j\}; j \in J; |(\{St_{(fc)}^{(e)}\} = \{St_{(ex)}^{(e)}\})|. \quad (9)$$

Справедливость утверждения 1 очевидна, если учесть, что требуется для всех процессов на всех иерархических уровнях равенство множеств ожидаемых  $\{St_{(ex)}^{(e)}\}$  и фактических  $\{St_{(fc)}^{(e)}\}$  пространств состояний.

Сформулируем утверждение, определяющее некоторые условия непротиворечивости принимаемых решений.

**Утверждение 2.** Если определено множество иерархических уровней  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$ , множество процессов (1) – (3), пространство начальных состояний (5), причем  $\{St_i^{(b)}\} \neq \emptyset$ , и выполняется (8), то цели принимаемых решений непротиворечивы, если при целенаправленном выполнении процессов справедливо:

$$\forall St_i^{(b)}, St_i^{(b)} \in \{St_i^{(b)}\}; \forall PR_{i(Le)}^{(S)},$$

$$PR_{i(Le)}^{(S)} \in \{PR_{i(Le)}^{(S)}\}, i \in I; \quad (10)$$

$$\forall Le_k, Le_k \in \{Le_k\} | (\{St_{(fc)}^{(e)}\} = \{St_{(ex)}^{(e)}\})|.$$

Справедливость утверждения 2 очевидна, если учесть, что требуется для всех начальных состояний всех процессов на всех иерархических уровнях равенство множеств ожидаемых  $\{St_{(ex)}^{(e)}\}$  и фактических  $\{St_{(fc)}^{(e)}\}$  пространств состояний.

**Замечание.** Очевидно, что как следует из утверждений 1 и 2, свойства непротиворечивости согласно утверждения 2 могут быть выявляться лишь при наличии для исследуемых процессов свойств достижимости.

Рассмотрим случаи, когда условия (8) не выполняются и

$$\mu_{PR}(k_0) < 1, \mu_{St}(k_0) < 1. \quad (11)$$

С учетом положения (9) можно сформулировать утверждение.

**Утверждение 3.** Если справедливо (9), причем  $\{St_i^{(b)}\} \neq \emptyset$ , и выполняется условие (11), то цели принимаемых решений достижимы, если при целенаправленном выполнении процессов справедливо:

$$\begin{aligned} Rch(S) = (Rch'(S) = true) \& ((\forall PR_i^{(S)}), \\ PR_i^{(S)} \in \{PR_i^{(S)}\} | ((\mu_{PR}(k_0) \geq \mu_{PR}(k_0)^{(доп)}) \& \\ \& (\mu_{St}(k_0) \geq \mu_{St}(k_0)^{(доп)}))), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\{Rch'(S)\}$  – выражение (10);

$\mu_{PR}(k_0)^{(доп)}, \mu_{St}(k_0)^{(доп)}$  – допустимые значения соответствующих функций принадлежности.

Справедливость (12) следует из (9) и определения функций принадлежности [8, 9]. С учетом положения (9), для выявления свойств непротиворечивости, можно сформулировать следующее утверждение.

**Утверждение 4.** Если справедливо (10), причем  $\{St_i^{(b)}\} \neq \emptyset$ , и выполняется условие (11), то цели принимаемых решений непротиворечивы, если при целенаправленном выполнении процессов справедливо:

$$\begin{aligned} \overline{Cont}(S) = (\overline{Cont}'(S) = true) \& ((\forall PR_i^{(S)}), \\ PR_i^{(S)} \in \{PR_i^{(S)}\} | ((\mu_{PR}(k_0) \geq \mu_{PR}(k_0)^{(доп)}) \& \\ \& (\mu_{St}(k_0) \geq \mu_{St}(k_0)^{(доп)}))), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\{\overline{Cont}'(S)\}$  – выражение (12).

Справедливость (13) следует из (10) и определения функций принадлежности [8, 9].

### Разработка критериев достижимости и непротиворечивости процессов принятия решений на нечетких сетевых моделях

Для решения поставленных задач достаточно эффективно использование моделей на основе развития аппарата сетей Петри. В работе [5] предложена нечеткая модель, которая может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \tilde{S}_C^{(M)}(f) = \langle \tilde{P}, \tilde{T}, \tilde{F}_C^{(M)}(f), \tilde{M}_{0C}(f), \\ \tilde{M}_C(f), L\{x_u\}, \tilde{C}, \tilde{V}, \tilde{K} \rangle, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\tilde{P}$  – множество нечетких позиций;  $\tilde{T}$  – множество нечетких переходов;  $L\{x_u\}, u \in U$  – некоторый предикат, отнесенный на модели к множеству позиций, переходов, функции инцидентности в пространстве состояний нечетких взаимодействующих процессов и определяющий дополнительные условия выполнения переходов;

$$\tilde{F}_C^M = \tilde{F}_C(f) \cup \tilde{F}_C(\text{Arc}) - \quad (15)$$

результующая нечеткая функция инцидентности [5] сети  $\tilde{S}_C(f)$ ;

$$\tilde{F}_C(f) = (\tilde{P} \times \tilde{T}) \cup (\tilde{T} \times \tilde{P}) - \quad (16)$$

функция инцидентности сети без ингибиторных дуг,

$\tilde{F}_C(\text{Arc})$  – входная инцидентность для некоторого перехода, определяемая наличием ингибиторных дуг и функцией цвета

$$\text{Arc}(\text{sn})_\alpha \in \{\text{Arc}_\beta\}, \alpha \in A, \beta \in B, A \subseteq B - \quad (17)$$

нечеткая функция инцидентностей  $\tilde{C}$  – функция цвета маркера, определяющая в данном случае цвет с каждого из маркеров  $\tilde{M}(\tilde{p}_j)$  для позиций сети;  $\tilde{V}$  – условия срабатывания переходов в зависимости от цвета маркера;  $\tilde{K}$  – емкость маркеров в позициях с учетом  $\tilde{C}$ ;  $\tilde{M}_C(f)_0$  – вектор начальной маркировки;  $\tilde{M}_C(f)$  – вектор текущей маркировки.

Для отображения и формализации процессов на модели примем достаточно распространенные в научных публикациях и исследованные, в частности работе [7], следующие правила интерпретации компонент модели:

– множество нечетких переходов  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$  модели интерпретирует множество действий  $\{\tilde{d}_r\}$ ,  $r \in \Gamma$  моделируемых нечетких процессов;

– множество нечетких позиций  $\tilde{p}_j \in \tilde{P}$  модели интерпретирует множество нечетких условий  $\tilde{U}_l, l \in L$  выполнения множества действий  $\{\tilde{d}_r\}$ ;

– функция цвета маркера  $\tilde{C}$ , интерпретирует множество признаков маркера, отображающего некоторую сущность объекта моделирования;

– динамика моделируемых процессов интерпретируется перемещением нечетких меток на множестве  $\{\tilde{p}_j\}$  через множество нечетких переходов;

– пространство состояний  $\{\text{St}_i\}$ ,  $i \in I$  динамических взаимодействующих нечетких процессов интерпретируется множеством векторов маркирования  $\{\tilde{M}_C(f)_s\}$ ,  $s \in S$  множества позиций  $\{\tilde{p}_j\}$  в пространстве состояний НСМ.

Таким образом, приняв рассмотренную выше интерпретацию компонент модели, определим критерии выявления свойств достижимости на модели.

**Утверждение 5.** Если определено множество иерархических уровней  $\{\text{Le}_k\}$ ,  $k \in K$  модели [6], множество переходов  $\tilde{T}$ , множество позиций  $\tilde{P}$ , множество векторов начального маркирования сети

$\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}$ ,  $s \in S$ , множество векторов конечного маркирования  $\{\tilde{M}_C(f)_{es}\}$ ,  $s \in S$ , причем

$\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\} \neq \emptyset$ , а также для переходов и позиций справедливо соответственно

$$\mu_{t_i(k_0)} \leq 1, \mu_{p_j(k_0)} \leq 1, \mu_{z_j(k_0)} \leq 1, \quad (18)$$

где  $\mu_{t_i(k_0)}, \mu_{p_j(k_0)}, \mu_{z_j(k_0)}$  – значения функций принадлежности для соответственно переходов, позиций и маркеров, то цели принимаемых решений достижимы, если при моделировании целенаправленного выполнения процессов справедливо:

$$\begin{aligned} & \forall \text{Le}_k, \text{Le}_k \in \{\text{Le}_k\}; \forall \tilde{p}_j, \tilde{p}_j \in \tilde{P}; \forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}; \\ & \{\tilde{M}_C(f)_{0s}\} \neq \emptyset, s \in S | ((\{\tilde{M}_{(\text{ex})}(f)_{es}\} = \\ & = \{\tilde{M}_{(\text{fc})}(f)_{es}\}) \& (\mu_{p_j(k_0)} \geq \mu_{p_j(k_0)}^{(\text{дон})}) \& \\ & \& (\mu_{t_i(k_0)} \geq \mu_{t_i(k_0)}^{(\text{дон})}) \& (\mu_{z_j(k_0)} \geq \mu_{z_j(k_0)}^{(\text{дон})})). \end{aligned} \quad (19)$$

Справедливость утверждения 5 очевидна, если учесть принятую интерпретацию модели и то, что для ненулевых начальных маркировок на всех иерархических уровнях из  $\{\text{Le}_k\}$ ,  $k \in K$  необходимо равенство множеств ожидаемых и фактических пространств состояний модели

$$\{\tilde{M}_{(\text{ex})}(f)_{es}\} = \{\tilde{M}_{(\text{fc})}(f)_{es}\},$$

а также обеспечение минимально допустимых значений функций  $\mu_{t_i(k_0)}, \mu_{p_j(k_0)}, \mu_{z_j(k_0)}$ .

**Утверждение 6.** Если определено множество иерархических уровней  $\{\text{Le}_k\}$ ,  $k \in K$  модели [6], множество переходов  $\tilde{T}$ , множество позиций  $\tilde{P}$ , множество векторов начального маркирования сети  $\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}$ ,  $s \in S$ , множество векторов конечного маркирования  $\{\tilde{M}_C(f)_{es}\}$ ,  $s \in S$ , причем  $\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\} \neq \emptyset$ , а также для переходов и позиций справедливо (18), то цели принимаемых решений непротиворечивы, если при моделировании целенаправленного выполнения процессов справедливо:

$$\begin{aligned} & \forall \text{Le}_k, \text{Le}_k \in \{\text{Le}_k\}; \forall \tilde{p}_j, \tilde{p}_j \in \tilde{P}; \forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}; \\ & \forall \tilde{M}_C(f)_{0s}, \tilde{M}_C(f)_{0s} \in \{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}, \{\tilde{M}_C(f)_{0s}\} \neq \emptyset, \\ & s \in S | ((\{\tilde{M}_{(\text{ex})}(f)_{es}\} = \{\tilde{M}_{(\text{fc})}(f)_{es}\}) \& \\ & \& (\mu_{p_j(k_0)} \geq \mu_{p_j(k_0)}^{(\text{дон})}) \& (\mu_{t_i(k_0)} \geq \\ & \geq \mu_{t_i(k_0)}^{(\text{дон})}) \& (\mu_{z_j(k_0)} \geq \mu_{z_j(k_0)}^{(\text{дон})})). \end{aligned} \quad (20)$$

Справедливость утверждения 6 очевидна, если учесть принятую интерпретацию модели и то, что для всех начальных маркировок из  $\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}$ ,  $s \in S$  на всех иерархических уровнях из  $\{\text{Le}_k\}$ ,  $k \in K$

необходимо равенство множеств ожидаемых и фактических пространств состояний модели

$$\{\tilde{M}_{(ex)}(f)_{es}\} = \{\tilde{M}_{(fc)}(f)_{es}\},$$

а также обеспечение минимально допустимых значений функций

$$\mu_{t_i}(k_0), \mu_{p_j}(k_0), \mu_{z_j}(k_0).$$

### Разработка методов анализа достижимости и непротиворечивости процессов принятия решений на иерархических уровнях нечетких сетевых моделях

Рассмотрим случаи, когда по крайней мере одно из условий из (19) или (20) не выполняется, достижимость принимаемых решений отсутствует или имеет место свойство противоречивости.

Существующие методы, например [10], решая ряд важных задач, принципиально не позволяют учитывать иерархичность взаимодействующих процессов при анализе достижимости и непротиворечивости, что исключает их из рассмотрения.

Для устранения указанной неадекватности в работе предлагается метод прямого и обратного анализа пространства состояний модели с целью модификации модели и процессов.

Для решения задачи модификации модели с целью обеспечения достижимости целей принимаемых решений предлагается метод, целью которого является минимизация расстояния между множествами ожидаемых  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}$  и фактических  $\{\tilde{M}_{C(f)}(f)_s\}$  векторов текущего маркирования на всех шагах моделирования взаимодействующих процессов.

Приняв в качестве меры нечеткое относительное расстояние Хемминга [8]

$$v(\tilde{A}, \tilde{B}) = \frac{d(\tilde{A}, \tilde{B})}{n}, \quad (21)$$

где

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sum_{i=1}^n |\mu_{\tilde{A}}(x_i) - \mu_{\tilde{B}}(y_i)|, \quad (22)$$

$n$  – мощность множеств  $|\tilde{A}|, |\tilde{B}|$ , причем  $|\tilde{A}| = |\tilde{B}|$ , а в качестве множества  $\tilde{A}$  множество  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}$ , в качестве множества  $\tilde{B}$  множество  $\{\tilde{M}_{C(f)}(f)_s\}$ , примем искомым критерий значение

$$\frac{d(\tilde{M}_{C(ex)}(f), \tilde{M}_{C(f)}(f))}{n} \rightarrow \min_{\tilde{F}_C^M}. \quad (23)$$

Таким образом предлагаемый метод предполагает целенаправленные действия на основе прямого и обратного моделирования и анализа ожидаемого и фактического пространств состояний с целью минимизации мощностей множеств

$$|\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}| = |\{\tilde{M}_{C(f)}(f)_s\}|, \quad (24)$$

которые приводят к нарушению адекватности моделируемых процессов.

Метод заканчивает функционирование, когда в критерии (23)

$$\frac{d(\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}, \{\tilde{M}_{C(f)}(f)_s\})}{n} = 0. \quad (25)$$

Рассмотрим основное содержание этапов предлагаемого метода.

1. Определить для всех переходов  $\forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}$  всех иерархических уровней  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$  модели условия маркирования их входных позиций, значения функций принадлежности  $\mu_{t_i}(k_0), \mu_{p_j}(k_0), \mu_{z_j}(k_0)$ .

2. Проверить условия маркирования и значения функций принадлежностей на условия разрешенности переходов согласно  $\tilde{R}_C^{(M)}(f)$  [5] с учетом присутствия ингибиторных дуг и выполнения функции цвета.

3. Если хотя бы один переход  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$  не разрешен, то необходимо выполнить некоторые из действий [2]:

$$- \forall t_i \in T | \mu_{t_i}(k_0) \geq \mu_{t_i}(k_0)^{(доп)}; \quad (26)$$

$$- \forall p_j \in (p_i(in)) | \mu_{p_j}(k_0) \geq \mu_{p_j}(k_0)^{(доп)}; \quad (27)$$

$$- \forall M_{C_{p_j} \in \{p_j(in)\}} | M_{C_{p_j}} \geq 1; \quad (28)$$

$$- \forall p_j \in (p_i(in)) | \mu_{z_j}(k_0) \geq \mu_{z_j}(k_0)^{(доп)}. \quad (29)$$

4. Если действия согласно (26) – (29) не приводят к разрешенности некоторых переходов из  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$ , то необходимо модифицировать структуру модели на всех иерархических уровнях с целью адекватного отображения логики взаимодействия процессов предметной области и выполнения условия (19).

**Замечание.** Для принятия решений согласно п.п. 1 – 5 метода целесообразно, в ряде случаев, использовать экспертные оценки.

Рассмотрим случаи, когда условие (20) не выполняется и существует противоречивость согласно разработанных критериев и справедливо  $\{\overline{Cont}(S)\} = true$ .

Для решения задачи модификации модели с целью обеспечения непротиворечивости  $\{\overline{Cont}(S)\} = true$  целей принимаемых решений предлагается метод, который включает такие действия.

1. Определить для всех переходов  $\forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}$  всех иерархических уровней  $\{Le_k\}$ ,  $k \in K$  модели

условия маркирования их входных позиций, значения функций принадлежности

$$\mu_{t_i}(k_0), \mu_{p_j}(k_0), \mu_{z_j}(k_0).$$

2. Проверить условия маркирования и значения функций принадлежностей на условия разрешенности переходов согласно  $\tilde{R}_C^{(M)}(f)$  [5] с учетом присутствия ингибиторных дуг и выполнения функции цвета.

4. Если хотя бы один переход из  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$  не разрешен, то необходимо выполнить некоторые из действий (26) – (29).

5. Если действия согласно (26) – (29) не приводят к разрешенности некоторых переходов из  $\tilde{t}_i \in \tilde{T}$ , то необходимо модифицировать структуру модели с целью выполнения (19) и обеспечения достижимости  $\{Rch(S)\} = true$  целей принимаемых решений.

6. Если условие (19) выполняется, то необходимо ввести дополнительно множество векторов текущей ожидаемой  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}$  и текущей фактической  $\{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_s\}$  маркировок.

7. Запустить модель на выполнение на множестве векторов начальных маркировок  $\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}, s \in S$ .

8. Если на некотором шаге моделирования, который определяется сменой векторов текущего маркирования, для некоторого вектора из  $\tilde{M}_C(f)_{0s} \in \{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}$ , не выполняется условие

$$\begin{aligned} \tilde{p}_j \in \tilde{P}; \forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}; \forall \tilde{M}_0(f)_s, \tilde{M}_C(f)_{0s} \in \{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}, \\ \{\tilde{M}_C(f)_{0s}\} \neq \emptyset, s \in S | ((\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\} = \\ = \{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_s\}) \& (\mu_{p_j}(k_0) \geq \\ \geq \mu_{p_j}(k_0)^{(доп)}) \& (\mu_{t_i}(k_0) \geq \\ \geq \mu_{t_i}(k_0)^{(доп)}) \& (\mu_{z_j}(k_0) \geq \mu_{z_j}(k_0)^{(доп)})), \end{aligned} \quad (30)$$

то необходимо модифицировать структуру модели на всех иерархических уровнях с целью адекватного отображения логики взаимодействия процессов предметной области и выполнения условия (30).

9. Действия согласно п. 7 – п. 8 выполнить для всех векторов из  $\{\tilde{M}_C(f)_{0s}\}, s \in S$  всех иерархических уровней  $\{Le_k\}, k \in K$  до совпадения соответствующих векторов из

$$\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}, \{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_s\}$$

с соответствующими векторами из

$$\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_{es}\}, \{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_{es}\}.$$

10. Действия согласно п. (1) – п. (9) выполнять

до выполнения (20) и  $\{\overline{Cont(S)}\} = true$ .

11. Если для некоторой текущей маркировки  $\{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_s\}$  при выполнении всех действий из множества возможных модификаций не будет выполняться условие (30), то вместо п.п. 7 – 10 выполняется обратный пошаговый целенаправленный анализ структуры модели и ее пространства состояний.

12. Запустить модель на выполнение обратной трассировки на множестве векторов ожидаемых конечных маркировок  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_{es}\}, s \in S$ .

13. Если на некотором шаге моделирования, который определяется сменой векторов текущего маркирования, для некоторого вектора из  $\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s \in \{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}$  не выполняется условие

$$\begin{aligned} \tilde{p}_j \in \tilde{P}; \forall \tilde{t}_i, \tilde{t}_i \in \tilde{T}; \forall \tilde{M}_{C(ex)}(f)_s, \tilde{M}_{C(ex)}(f)_s \in \\ \in \{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}, \{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\} \neq \emptyset, s \in S | \\ |((\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\} = \tilde{M}_{C(fc)}(f)_s) \& (\mu_{p_j}(k_0) \geq \\ \geq \mu_{p_j}(k_0)^{(доп)}) \& (\mu_{t_i}(k_0) \geq \mu_{t_i}(k_0)^{(доп)}) \& \\ \& (\mu_{z_j}(k_0) \geq \mu_{z_j}(k_0)^{(доп)})), \end{aligned} \quad (31)$$

то необходимо модифицировать структуру модели на всех иерархических уровнях с целью адекватного отображения логики взаимодействия процессов предметной области и выполнения условия (31).

14. Действия согласно п. 11 – п. 13 выполнить для всех векторов из  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_{es}\}, s \in S$  всех иерархических уровней  $\{Le_k\}, k \in K$  до совпадения соответствующих векторов из  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_s\}, \{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_s\}$  с соответствующими векторами из  $\{\tilde{M}_{C(ex)}(f)_{0s}\}, \{\tilde{M}_{C(fc)}(f)_{0s}\}$ .

15. Действия согласно п. (1) – п. (9) выполнять до выполнения (20) и  $\{\overline{Cont(S)}\} = true$ .

**Замечание.** Для принятия решений согласно п. 1 – п. 15 метода целесообразно, в ряде случаев, использовать экспертные оценки.

### Рекомендации по применению теоретических положений исследований

Ряд сложных объектов, к которым в первую очередь следует отнести газотранспортные, газораспределительные и перерабатывающие предприятия функционируют в условиях повышенной опасности, неопределенности состояния технических средств реализации технологических процессов [11].

Такие объекты обычно являются ярко выраженными иерархическими и распределенными структурами при их функционировании и управлении.

В связи с этим проблема достижимости и непротиворечивости в принятии решений является важной и актуальной.

Для разработанных нечетких моделей, критериев и методов предложены алгоритмические и инструментальные средства применения их в практических реализациях. Применения подходов подтвердили эффективность теоретических положений и принятых практических решений на реальных объектах.

### Выводы

1. Сформулирована постановка задачи достижимости целей и непротиворечивости принимаемых решений, как анализ нечеткого пространства состояний и структуры модели.

2. Получили дальнейшее развитие критерии выявления свойств достижимости и непротиворечивости для процессов, представленных нечеткой сетевой моделью, которые в отличие от существующих отличаются тем, что они реализуются на некотором множестве иерархических уровней модели и позволяют повысить достоверность принятия решений за счет структурированного анализа особенностей взаимодействия процессов моделирования.

3. Впервые предложен метод анализа свойств достижимости и непротиворечивости при взаимодействии нечетких иерархических процессов, включающий прямой и обратный пошаговый целенаправленный анализ нечеткого пространства состояний и структуры модели с целью выявления, локализации и устранения неадекватности с последующей модификацией модели и моделируемых процессов на множестве иерархических уровней.

4. Перспективным направлением применения теоретических положений работы является оценка состояний объектов, функционирующих в условиях повышенной опасности, неопределенности состояния технических средств.

### Список литературы

1. Вейцман К. Распределение системы мини- и микроЭВМ. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 362 с.
2. Кучеренко Е.И. К проблеме анализа достижимости принимаемых решений // АСУ и приборы автоматики. – 2001. – Вып. 114. – С. 11-16.
3. Кучеренко Е.И. К вопросу о непротиворечивости принимаемых решений в нечетких условиях функционирования объектов анализа // АСУ и приборы автоматики. – 2000. – Вып. 113. – С. 75-81.
4. Кучеренко Е.И. О модификации нечетких сетевых моделей при решении одного класса задач // АСУ и приборы автоматики. – 2002. – Вып. 118. – С. 105-110.
5. Кучеренко Е.И., Краснокутский Д.Е. Гибридные математические модели на основе расширенной нечеткой сети Петри // Бюлетень інтелекту. – 2007. – № 1(66). – С. 64-67.
6. Кучеренко Е.И., Краснокутский Д.Е. Об одном подходе к построению нечетких гибридных моделей сложных систем // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2007. – № 9(67). – С. 58-62.
7. Кучеренко Е.И., Фадеев В.А. Инструментальные средства моделирования процессов управления технологическими комплексами машиностроения // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ, 2000. – Вып. 14. – С. 166-168.
8. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств.: Пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
9. Tsoukalas L.H., Uhrig R.E. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering. – New York: John Wiley&Sons, Inc, 1997. – 587 p.
10. Кучеренко Е.И. Об одном методе анализа взаимодействующих процессов на нечетких сетевых моделях // АСУ и приборы автоматики. – 2001. – Вып. 116. – С. 4-13.
11. Кучеренко Е.И., Краснокутский Д.Е. Моделирование процессов принятия решений в производствах с использованием интеллектуальных технологий // Межд. НК "Теория и техника передачи, приема и обработки информации": Сб. тезисов докладов. – Х.: ХНУРЭ, 2004. – Ч.2. – С. 56-57.

Поступила в редакцию 12.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Филатов, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### МЕТОДИ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ В НЕЧІТКОМУ ПРОСТОРИ СТАНІВ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ ІЄРАРХІЇ МЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ

Є.І. Кучеренко, Д.Є. Краснокутський

*Розглянуті питання аналізу адекватності нечітких взаємодіючих процесів об'єктів, що характеризуються розподеленістю і ієрархічністю. Запропоновані критерії і методи виявлення властивостей досяжності і несуперечності, цілеспрямованій модифікації моделі, представленої в нечіткому просторі станів. Вперше запропонований метод аналізу властивостей досяжності і несуперечності при взаємодії нечітких ієрархічних процесів, що включає прямий і зворотний покроковий цілеспрямований аналіз нечіткого простору станів і структури моделі. Сформульовані рекомендації по практичному застосуванню х положень роботи в реальних системах.*

**Ключові слова:** нечітка модель, нечіткі мережі Петрі, ієрархія, досяжність, несуперечність, інтелектуальна система.

### METHODS OF ANALYSIS OF PROCESSES OF MAKING A DECISION IN UNCLEAR SPACE OF PROBLEMS OF OBJECTS ON BASIS OF HIERARCHY OF NETWORK MODELS

E.I. Kucherenko, D.E. Krasnokutskiy

*The questions of analysis of adequacy of unclear interactive processes of objects are considered, characterized state of distribution and hierarchicalness. Criteria and methods of exposure of properties of attainability and uncontradiction are offered, to purposeful modification of model, presented in unclear space of problems. The method of analysis of properties of attainability*

*and uncontradiction is first offered at unclear hierarchical interprocess communication, including the direct and reverse incremental purposeful analysis of unclear space of problems and model structure Formulated recommendation on practical application of  $x$  positions of work in the real systems.*

**Keywords:** *unclear model, unclear networks of Petri, hierarchy, attainability, uncontradiction, intellectual system.*