

Динамическая модель представления знаний в интеллектуальных системах контроля сложных технологических процессов¹

Аннотация. Разработана оригинальная модель представления динамических знаний в интеллектуальных системах контроля сложных технологических процессов и прогнозирования аномальных ситуаций в виде нечетко помеченной растущей семантической сети. Предложенная модель позволяет адекватным образом описывать сложные многопараметрические динамические технологические процессы и на этой основе осуществлять контроль над их течением в процессе реализации на основе сравнения фактической и эталонной динамической модели поведения объекта управления во времени. Разработаны правила сравнения между собой различных нечетких растущих семантических сетей, которые позволяют реализовать автоматический контроль сложных технологических процессов в нестабильной окружающей среде.

Ключевые слова: интеллектуальная система контроля, динамический технологический процесс, аномальная ситуация, нечеткая растущая семантическая сеть.

Введение

Многообразие технологических процессов (ТП) в различных прикладных областях и предъявляемые к ним требования приводят к необходимости обобщения и систематизации имеющихся подходов к автоматическому построению и сравнению между собой различных ТП на основе информационно-аналитических моделей, отражающих знания об их параметрах, структуре и динамике реализации [1, 2].

Одной из актуальных задач является также разработка эффективных интеллектуальных систем контроля различных сложных ТП на объекте управления в нестабильной окружающей среде (ОС) и прогнозирования аномальных ситуаций на основе сравнения эталонной и фактической модели их текущих состояний, которые возникают в результате влияния на данные состояния различных возмущающих факторов. Кроме того, сравнение различных состояний ТП между собой является актуальной задачей в различных приложениях, включая САПР, управление промышленным производством и медицину [3].

Следует отметить, что для построения эффективной системы контроля и прогнозирования аномальных ситуаций на ТП требуется наличие знаний, представляющих собой накопленный опыт, который отражает протекающие на объекте управления процессы и связанные с ними проявления отклонений от их нормального течения. Для идентификации таких динамических процессов имеющиеся знания и опыт, определяющий их нормальное течение, необходимо структурировать и формализовать в виде адекватных информационно-аналитических моделей. Известные в системах искусственного интеллекта модели представления знаний [4] не позволяют в полной мере эффективным образом выполнить описание сложных динамических процессов в пространстве и времени, например, адекватным образом охарактеризовать динамику изменения во времени многофакторных ТП и процессов подготовки прогнозируемых событий. Широкое применение в настоящее время для описания динамических процессов различной природы нашли когнитивные динамические модели [5, 6], однако когнитивные карты и построенные на их основе

динамические модели представления знаний в интеллектуальных системах прогнозирования ситуаций нашли ограниченное применение. К недостаткам можно отнести то, что они строятся «вручную» и со сменой проблемной ситуации, например, при появлении в ней новых дополнительных возмущающих факторов, перестраивается практически вся структура когнитивной модели. Во главе анализа развития ситуаций, описанных на основе когнитивных моделей, лежит метод имитационного моделирования [7], что привязывает результаты такого исследования к конкретным условиям его реализации. Динамический процесс в этом случае рассматривается как переход от одной ситуации к другой в результате воздействия различных факторов внешней среды даже при изменении одного входящего в них параметра, что делает формируемую модель знаний неоправданно громоздкой. К тому же отсутствуют эффективные процедуры автоматической идентификации и сравнения между собой когнитивных моделей. Отмеченные выше обстоятельства существенно ограничивают эффективность применения когнитивных моделей для представления знаний, описывающих сложные многофакторные динамические процессы в реальном времени.

В данной работе предлагается специальная модель представления динамических знаний, имеющая структуру, обеспечивающую возможность автоматического ее построения в виде нечеткой растущей семантической сети (НРСС). В отличие от известных моделей аналогичного типа, например [8], НРСС позволяет описывать и сравнивать сложные многофакторные динамические процессы, выявлять отклонения и строить различные прогнозы возникновения аномальных ситуаций. В осно-

ве автоматического построения прогнозов лежит формирование в реальном времени модели, характеризующей динамику процесса появления аномальной ситуации, и ее сравнение с эталонными моделями представления знаний. Достоверность построенных таким образом прогнозов, зависит от количества используемых предвестниковых факторов, от полноты и непротиворечивости знаний, заложенных в память.

1. Многослойные гиперграфы и их применение для построения НРСС

Рассмотрим особенности применения многослойных гиперграфов для построения НРСС. В общем случае классический гиперграф G_K определяется тройкой [9] $G_K = (V, E, R)$, где $V = \{v_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ - множество вершин; $E = \{e_j\}, j = 1, 2, \dots, m$ - множество ребер; R - двуместные предикаты или отношения между ребрами и инцидентными им вершинами.

На Рис. 1 видно, что гиперграф представляет собой структуру, в которой инцидентными с одним ребром могут быть несколько вершин. Рассмотрим множество графов $G_m = \{G_j\}, j = 1, 2, \dots, m$, каждый из которых является, например, простой цепью, количество вершин в которой может расти в направлении, определяемом стрелками ребер. Кроме того, для каждой пары различных графов $G_j, G'_j \in G_m$ выполняется следующее условие: $(V_j \cap V'_j = \emptyset) \& (E_j \cap E'_j = \emptyset)$, где $\&$ означает одновременное выполнение правой и левой части условия.

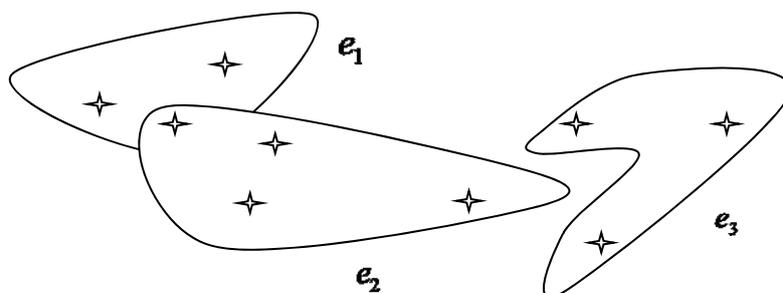


Рис. 1. Структура классического гиперграфа
звездами обозначены его вершины

Определим множество $V^* = \bigcup_{j=1}^m V_j$ как множество вершин формируемого гиперграфа, которое образовано классами эквивалентности V_j вершин, полученных на основе отношения «Принадлежать к одной простой цепи G_j ». Построим следующее биективное соответствие («Вершины одного класса эквивалентности V_j инцидентны одному e_j ребру формируемого гиперграфа») между классами эквивалентности вершин $V_j \in V^*$ и ребрами формируемого гиперграфа. В результате получим гиперграф, у которого инцидентные одному ребру вершины представляют собой растущую простую цепь (количество вершин увеличивается во времени), т.е. связаны между собой еще и обычными ребрами.

Рассмотрим гиперграф $G^* = (V^*, E^*)$, вершинам которого $v_j^* \in V^*, j = 1, m$ биективно соответствуют ребрам сформированного выше гиперграфа, а дуги $e_l^* \in E^*, l = 1, m^*$ связывают между собой смежные по определению вершины $v_j^* \in V^*$ (Рис. 2). Назовем полученную таким образом иерархическую структуру многослойным гиперграфом.

Применение многослойных гиперграфов $G^* = (V^*, E^*)$ с растущими вершинами позволяет путем пометки их вершин и ребер сформировать растущие динамические семантические сети и формализовать на этой основе сложные многофакторные динамические процессы.

Таким образом, формально НРСС представляет собой нечетко помеченный многослойный гиперграф $G = (V, E, v_0)$, где $V = \{v_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ - множество вершин, представляющих собой графы, описывающие динамику изменения различных по своей природе отдельных предвестниковых факторов; $E = \{e_j\}, j = 1, 2, \dots, m$ - множество ребер, определяющих характер пространственных и временных отношений между различными факторами окружающей среды и объекта управления; v_0 - идентификатор или ключевая вершина, относительно которой выполняется сравнение между собой различных НРСС; она помечается соответствующим формируемой модели прогнозируемым событием на объекте управления.

В общем случае используемые для пометки НРСС предвестниковые факторы могут быть двух видов: параметрические события и «мягкие» явления. Параметрическими («жесткими») будем называть устойчиво повторяющиеся факторы различной природы, которые можно оценить количественно, например, характер изменения температуры объекта относительно заданного ее значения в эталонной НРСС. «Мягкими» явлениями назовем устойчиво повторяющиеся факторы, которые можно наблюдать, но сложно или невозможно оценить количественно.

Параметрические факторы в НРСС определяются вершинами $v_i \in V$, помеченными соответствующим им идентификатором, и графом $G_i(i) = (A_i, E_i, v_{i1}(0))$, описывающим динамику изменения данного фактора во времени, где:

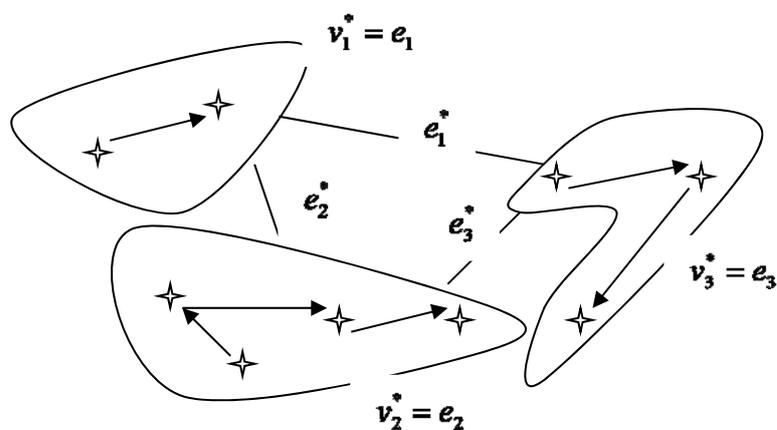


Рис. 2. Структура многослойного гиперграфа
звездами и стрелками обозначены, соответственно, вершины и ребра графов $G_j \in G_m$

$A_i = \{a_{i1}^*\}, i_1 = 1, 2, \dots, n_{i1}(1)$ - множество вершин графа G_i , которые помечаются наблюдаемыми в среде значениями a_{i1}^* параметра a_i в процессе его изменения в течение отчетного периода времени;

$E_i = \{t_{i1,j1}\}, j_1 = 1, 2, \dots, n_{i1}(2)$ - множество ребер в графе G_i , которые помечаются моментами времени фиксации происходящих в проблемной среде изменений значений a_{i1}^* параметра a_i в течение периода наблюдения;

$v_{i1}(0)$ - ключевая вершина, помеченная парой, первая проекция которой определяется исходным значением $a_{i1}^*(0)$ параметра a_i , а вторая - временем $t_{i1}(0)$, определяющим начало отсчета его изменений.

Таким образом, динамика $D(a_{i1})$ изменения протекающих процессов с учетом каждого параметра a_{i1} определяется множеством пар:

$$D(a_{i1}) = \{ \langle a_{i1,j1}, t_{i1,j1} \rangle \}, \\ i_1 = 1, 2, \dots, n_1^{(1)}, j_1 = 1, 2, \dots, n_1^{(2)},$$

где $n_1^{(1)}, n_1^{(2)}$ - соответственно, количество параметров $a_{i1,j1}$, наблюдаемых в окружающей среде и на объекте, а также количество зафиксированных в отчетном периоде изменений данных параметров; $t_{i1,j1}$ - моменты фиксации изменений соответствующих параметров, которые определяются датой $d_{i1,j1}$ и временем $t_{i1,j1}^*$ наблюдаемых в ОС и на объекте изменений соответствующих им параметров.

Текущие значения параметров a_{i1} определяются парами $a_{i1,j1} = \langle a_{i1,j1}^*, R_{i1,j1} \rangle$, в первых элементах которых фиксируются измеренные в моменты времени $t_{i1,j1}^*$ их значения $a_{i1,j1}^*$, а во второй - термы $R_{i1,j1}$ лингвистической переменной (ЛП) [10], определяющей вербальные (словесные) или интервальные значения соответствующего параметра.

Моменты фиксации времени $t_{i1,j1}^*, j_1 = 1, 2, \dots, n_1^{(2)}$ в формируемой модели происходящих изменений параметров $a_{i1,j1}$ зависят от характера протекающих в них процессов и определяются одним из следующих способов. Для ОС с медленным течением происходящих в

них процессов подготовки, данные моменты времени совпадают с моментами времени выполнения следующего условия: $\langle |a_{i1,j1}^* - a_{i1,j1+1}^*| > \varepsilon_0 \rangle$ или когда разность между зафиксированным в предыдущий момент времени $t_{i1,j1}$ значением параметра анализируемого процесса и текущим его значением в момент времени $t_{i1,j1+1}$ превысит допустимую величину отклонения ε_0 .

Для ОС с быстрым течением происходящих в них процессов моменты времени $t_{i1,j1+1}$ фиксации изменившихся значений $a_{i1,j1}^*$ параметров $a_{i1,j1}$ анализируемого процесса, определяются следующим образом:

- при выполнении условия:

$$\langle |a_{i1,j1}^*(t) - a_{i1,j1+1}^*(t)| \leq \varepsilon_0 \rangle;$$

- при изменении скорости течения анализируемого процесса:

$$\frac{|a_{i1,j1+1}^* - a_{i1,j1}^*|}{t_{i1,j1+1} - t_{i1,j1}} \neq \frac{|a_{i1,j1+2}^* - a_{i1,j1+1}^*|}{t_{i1,j1+2} - t_{i1,j1+1}},$$

- при изменении знака разности между тремя измеренными в различные моменты времени значениями параметров процесса, т.е. при выполнении, например, следующего условия:

$$((a_{i1,j1+1} - a_{i1,j1}) > 0) \& ((a_{i1,j1+2} - a_{i1,j1+1}) < 0),$$

где $\&$ - операция, означающая одновременное выполнение условий в правой и левой части приведенного выражения.

Вершины $v_i^2 \in V$, которые помечены «мягкими» явлениями $B = \{b_{i2}\}, i_2 = 1, 2, \dots, n_3$ в НРСС определяются множествами их качественных характеристик $X_{i2} = \{x_{i3}\}, i_3 = 1, 2, \dots, n_{i2}$, например, $X_{i2} = \{ \langle \text{«границы проявления явления } b_{i2} \in B \text{ в ОС сильно размыты»}, \langle \text{«периоды времени между повторными появлениями и исчезновениями явления } b_{i2} \in B \text{ достаточно большие} \rangle \}$ и т.п., а также кортежами, которые упорядочивают моменты времени их появления t_{i1i2} и исчезновения t_{i1i2} в течение отчетного периода.

Отношения между смежными вершинами v_i и v_i^* в НРСС $G = (V, E, v_0)$ или пометки ее ребер E определяются множеством следующих пар:

$$E = \{ \langle \varphi_{k1}, \varphi_{k2} \rangle \}, k_1, k_2 = 1, 2, \dots, n,$$

где $\varphi_{k1} = \langle r_{k1}, R_{k1} \rangle$ - отношения пространства состояний, определяемые количественными r_{k1}

и качественными R_{k1} оценками, например, расстояние между одновременно происходящими в ОС событиями, которыми помечены вершины v_i и v_i^* , равно 2 м, которое является достаточно «большим»; $\varphi_{k2} = \langle r_{k2}, R_{k2} \rangle$ - временные отношения, которые характеризуются количественными r_{k2} и качественными R_{k2} оценками, например, изменение параметра, которым помечена вершина v_i , произошло на двое суток раньше, чем изменение параметра, которым помечена смежная с ней вершина v_i^* и т.п.

Для сравнения динамических моделей представления знаний в процессе принятия решений многослойные гиперграфы, на основе которых формируются НРСС, следует представить в виде матриц соответствия пометок инцидентных вершин и ребер. В общем случае матрица M_1 соответствия пометок вершин и ребер первого слоя гиперграфа $G^* = (V^*, E^*, v_0)$ будет включать следующие три поля: пометки ребер $e_j \in E$; пометки вершин $v_i^j \in V_j$ смежных ребру e_j ; характер изменения значений параметров, которым помечены ребра первого слоя гиперграфа (падает, растет, меняется периодически).

Соответствие пометок вершин и ребер второго слоя гиперграфа $G^* = (V^*, E^*, v_0)$ будет определяться матрицей M_2 , имеющей такую же структуру, как и матрицы инцидентности обычных помеченных графов.

Для дальнейшего обобщения знаний в гиперграфе $G^* = (V^*, E^*, v_0)$ можно сформировать третий слой. Для этого множество вершин V^* разбивается на классы эквивалентности по признаку принадлежности их пометок к классу параметров с одинаковым характером изменения значений, например, множество параметров, значения которых растут в процессе подготовки прогнозируемой ситуации. Каждый такой класс вершин будет определять ребро третьего слоя формируемого гиперграфа и т.д., до получения требуемого уровня обобщения.

2. Инструментальные средства сравнения НРСС

Основной операцией, которая выполняется над различными НРСС в процессе построения

прогнозов, является сравнение фактической семантической сети с эталонными прогнозными моделями ТП, хранящимися в памяти интеллектуальной системы контроля и прогнозирования. Для прогнозирования аномальных ситуаций на различных стадиях их подготовки может выполняться также операция оценки вложенного изоморфизма текущей динамической модели ОС и объекта управления в реальном времени в модель одного из эталонных динамических процессов, хранящихся в базе знаний.

Уровень достоверности построенных на этой основе прогнозов определяется на интервале $[0-1]$ и зависит от следующих основных факторов:

- полноты и непротиворечивости информации, использованной для построения эталонных моделей процессов подготовки аномальных ситуаций и величины интервалов отчетного периода;
- степени совпадения моделей ТП с их эталонной моделью.

В зависимости от характера решаемой задачи прогнозирования сравнение между собой НРСС может проводиться:

- на предмет равенства сравниваемых между собой оценок пометок в соответствующих им многослойных гиперграфах и графах с заданной точностью ε , которые характеризуют динамику параметров и «мягких» явлений;
- на предмет оценки степени нечеткого равенства и аналогии между оценками, а также динамикой параметров и «мягких» явлений, которые наблюдаются в процессе прогнозирования аномальных ситуаций.

Для первого случая предлагается использовать следующее правило сравнения НРСС между собой.

Правило сравнения 1. Две произвольные НРСС, определяемые гиперграфами $G_1(\mathcal{E}) = (V(\mathcal{E}), E_1(\mathcal{E}), v_0(\mathcal{E}))$ и $G_2(\Phi) = (V_2(\Phi), E_2(\Phi), v_0(\mathcal{E}))$ и графами $G_i, i=1, 2, \dots, n$, (здесь и далее обозначениями (\mathcal{E}) и (Φ) помечаются все элементы, которые относятся к описанию эталонной и фактической НРСС) биективно соответствующими вершинам данных гиперграфов, являются идентичными (с заданной точностью сравнения между собой одноименных в них пометок ε), если для них выполняются ниже следующие условия.

1. Многослойные гиперграфы $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ являются структурно эквивалентными с точностью до одинаковых по содержанию пометок их вершин и ребер, включая ключевые вершины v_{01} и v_{02} .

2. Для каждой пары одноименных вершин $\langle v_{i1}(\mathcal{E}), v_{i1}(\Phi) \rangle, v_{i1}(\mathcal{E}) \in V_1(\mathcal{E}), v_{i1}(\Phi) \in V_2(\Phi)$, занимающих в сравниваемых гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ одинаковые позиции и помеченных параметрическими событиями, выполняются условия:

а) графы $G_i(\mathcal{E}) = (V_i(\mathcal{E}), E_i(\mathcal{E}), v_{i1, \mathcal{E}}(0))$ и $G_i(\Phi) = (V_i(\Phi), E_i(\Phi), v_{i1, \Phi}(0))$, которыми помечены, соответственно, вершины $v_{i1}(\mathcal{E}) \in V_1$ и $v_{i1}(\Phi) \in V_2$ имеют одинаковое количество ребер, т.е. параметр a_i имеет одинаковое количество зафиксированных изменений в эталонной и текущей динамической модели;

б) выполняются условия равенства

– между всеми сравниваемыми значениями одноименных параметров и явлений, которые зафиксированы в одинаковые моменты времени в сравниваемых НРСС:

$$\langle \langle |a_{i1, j1}^*(\mathcal{E}) - a_{i1, j1}^*(\Phi)| \leq \varepsilon_0 \rangle \& (R_{k1, j1}(\mathcal{E}) = R_{k1, j1}(\Phi)) \& (R_{k2, j1}(\mathcal{E}) = R_{k2, j1}(\Phi)), j_1 = 1, 2, \dots, n_1^{i1} \rangle \rangle,$$

или равенство с заданной точностью соответствующих им значений параметров для одинаковых фиксаций времени изменения;

– между количеством вершин n_1^{i1} в попарно сравниваемых графах $G_i(\mathcal{E}), i = 1, n$ и $G_i(\Phi), i = 1, n$ описывающих динамику изменения биективно соответствующих им i_1 -х параметров соответственно в гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$;

в) соблюдаются условия равенства с заданной точностью ε между моментами времени фиксации одинаковых значений параметров и «мягких» явлений в сравниваемых между собой НРСС: $\langle (t_{i1, j1}(\mathcal{E}) - t_{i1, j1}(\Phi)) \leq \varepsilon \rangle$.

3. Для каждой пары вершин $\langle v_i(\mathcal{E}), v_i(\Phi) \rangle$, занимающих одинаковые позиции соответственно в гиперграфах $G_1(\mathcal{E}), G_2(\Phi)$ и помеченных, соответственно, явлениями $b_{i2}(X_{i2}(\Phi))$ и $b_{i2}(X_{i2}(\mathcal{E}))$, выполняются условия:

а) обе сравниваемые между собой вершины определяются одинаковыми множествами характеристик, т.е. множествами, для которых выполняется условие:

$$\langle \langle (X_{i2}(\Phi) \subseteq X_{i2}(\mathcal{E})) \& (X_{i2}(\mathcal{E}) \subseteq X_{i2}(\Phi)) \rangle \rangle;$$

б) совпадают с заданной точностью ε моменты времени появления и исчезновения, биективно соответствующих им явлений, т.е. выполняются следующие условия:

$$\langle \langle (|t_{i12}(\mathcal{E}) - t_{i12}(\Phi)| \leq \varepsilon) \& (t_{i12}(\mathcal{E}) - t_{i12}(\Phi)) \leq \varepsilon), i_2 = 1, 2, \dots, n \rangle \rangle;$$

в) в гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ совпадает количество фиксаций времени появления и исчезновения соответствующих этим вершинам мягких явлений $b_{i2}(X_{i2}(\Phi))$ и $b_{i2}(X_{i2}(\mathcal{E}))$.

4. Ребра в гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ и графах $G_i, i = 1, n$, инцидентные одинаково помеченным в них парам смежных вершин, имеют равные с допустимой погрешностью ε значения пометок.

Для приведенного выше правила оценки равенства сравниваемых между собой НДСС с заданной погрешностью отклонений значений пометок одноименных в них вершин и ребер, можно доказать следующее утверждение.

Утверждение 1. *Временная сложность сравнения между собой двух НРСС, определяемых многослойными гиперграфами $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, а также графами $G_i(\mathcal{E}); G_i(\Phi), i = 1, n$, биективно соответствующих вершинам их второго слоя, с заданной точностью ε значений пометок их вершин и ребер, имеет порядок:*

$$[n^2 + \sum_{i=1}^n n_1^2(i) + 2 \sum_{i=1}^n (n_{i1}(i) + m_{i1}(i))],$$

где n - количество вершин в многослойных гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, которые определяют сравниваемые между собой НРСС; $n_{i1}(i)$ и $m_{i1}(i)$ - соответственно количество вершин и ребер в графах $G_i(\mathcal{E})$ и $G_i(\Phi), i = 1, n$ описывающих динамику параметров a_{i1} , которыми помечены одинаковые вершины второго слоя соответственно в гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$.

Доказательство приводится в Приложении 1.

Во втором случае, при сравнении между собой НРСС в процессе прогнозирования аномалий, для оценки степени нечеткого равенства между ними, для представления каждого пара-

метра a_{i1} и «мягкого» явления b_{i2} в процессе их построения используется признак (предвестник) с соответствующим его содержанию названием. Это позволяет:

- во-первых, каждую характеристику $x_{i3} \in X_{i2}$ «мягкого» явления b_{i2} приближенно задать количественным образом x_{i3}^* , определяя место ее текущего значения экспертным путем на базовой шкале ЛП, биективно соответствующей этому явлению;

- во-вторых, обеспечить возможность оценки степени нечеткого равенства между значениями сравниваемых в НДСС пометок, представив количественные значения a_{i1}^* и b_{i2}^* , соответственно, параметров a_{i1} и мягких событий b_{i2} в нечеткой форме, например, для эталонной сетевой модели, в виде следующих пар:

$$\langle \mu(a_{i1}^*(\mathcal{E})), T_j(a_{i1}^*(\mathcal{E})) \rangle \text{ и}$$

$$\langle \mu(b_{i2}^*(\mathcal{E})), T_j(b_{i2}^*(\mathcal{E})) \rangle, j=1,2,\dots,5,$$

где $\mu(a_{i1}^*(\mathcal{E}))$ и $\mu(b_{i2}^*(\mathcal{E}))$ - соответственно степени принадлежности количественного значения a_{i1}^* параметра a_{i1} и количественного значения b_{i2}^* «мягкого» явления b_{i2} к нечетким множествам, которые определяются термами $T_j(a_{i1}^*(\mathcal{E}))$ и $T_j(b_{i2}^*(\mathcal{E}))$ в биективно соответствующих им лингвистических переменных.

Аналогичным образом, в нечеткой форме представления, например, для эталонных НДСС в виде следующих пар $\langle \mu(x_{i3}^*(\mathcal{E})), T_j(x_{i3}^*(\mathcal{E})) \rangle$ можно также определить различные характеристики $x_{i3}(\mathcal{E}) \in X_{i2}(\mathcal{E})$ «мягких» явлений b_{i2} .

Правило сравнения 2. Две произвольные НДСС, которые определяются многослойными гиперграфами $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, нечетко равны между собой, если для них выполняются ниже следующие условия.

1. Многослойные гиперграфы $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ и графы $G_i(\mathcal{E})$ и $G_i(\Phi)$, которыми помечены одинаковые в них вершины второго слоя, являются структурно эквивалентными.

2. Для каждой пары вершин $\langle v_i(\mathcal{E}), v_i(\Phi) \rangle, v_i(\mathcal{E}) \in V_1, v_i(\Phi) \in V_2$, помеченных в многослойных гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и

$G_2(\Phi)$ одноименными параметрами, выполняются условия:

а) пары одинаковых вершин второго слоя в многослойных гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, помеченные соответственно графами $G_i(\mathcal{E})$ и $G_i(\Phi), i=1, n$ имеют одинаковое число фиксаций, происходящих в ОС или на объекте управления изменений соответствующего им параметра a_{i1} ;

б) все степени нечеткого равенства $\rho_{i1}(a_{i1,j1}^*(\mathcal{E}), a_{i1,j1}^*(\Phi))$ сравниваемых между собой значений одноименных параметров в эталонной и фактической НДСС для одновременных по времени фиксаций, удовлетворяют условию: « $\rho_{i1}(a_{i1,j1}^*(\mathcal{E}), a_{i1,j1}^*(\Phi)) > 0,5$ ».

Данные степени нечеткого равенства $\rho_{i1}(a_{i1,j1}^*(\mathcal{E}), a_{i1,j1}^*(\Phi))$ сравниваемых между собой нечетко заданных значений параметров определяются следующим образом [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если выполняется:} \\ (|\mu(a_{i1,j2}^*(\mathcal{E})) - \mu(a_{i1,j2}^*(\Phi))| \leq \varepsilon) \& \\ (T_j(a_{i1,j2}^*(\mathcal{E})) = (T_j(a_{i1,j2}^*(\Phi)))) , \\ \text{то } \rho_{i1}(a_{i1,j1}^*(\mathcal{E}), a_{i1,j1}^*(\Phi)) = 1, \text{ иначе,} \\ \text{если выполняется:} \\ (|\mu(a_{i1,j2}^*(\mathcal{E})) - \mu(a_{i1,j2}^*(\Phi))| \leq \varepsilon) \& \\ (T_j(a_{i1,j2}^*(\mathcal{E})) = (T_j(a_{i1,j2}^*(\Phi)))) , \\ \text{то } \rho_{i1}(a_{i1,j1}^*(\mathcal{E}), a_{i1,j1}^*(\Phi)) = \\ = (\mu(a_{i1,j2}^*(\mathcal{E})) \overset{\sim}{\leftrightarrow} \mu(a_{i1,j2}^*(\Phi))), \\ \text{иначе } \rho_{i1}(a_{i1,j1}^*(\mathcal{E}), a_{i1,j1}^*(\Phi)) = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где ε - допустимая погрешность сравнения; $\overset{\sim}{\leftrightarrow}$ - операция нечеткой эквивалентности по [12].

3. Для всех пар вершин $\langle v_i(\mathcal{E}), v_i(\Phi) \rangle, v_i(\mathcal{E}) \in V_1(\mathcal{E}); v_i(\Phi) \in V_2(\Phi)$, помеченных в гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ одноименными «мягкими» явлениями, выполняются условия:

а) множества характеристик $X_{i2}(\mathcal{E})$ и $X_{i2}(\Phi)$, определяющих «мягкое» явление b_{i2} которым помечены соответственно вершины $v_i(\mathcal{E}) \in V_1(\mathcal{E}), v_i(\Phi) \in V_2(\Phi)$ совпадают, т.е. для

каждой такой пары выполняется условие: « $(X_{i_2}(1) \subseteq X_{i_2}(2)) \& (X_{i_2}(2) \subseteq X_{i_2}(1))$ »;

б) количества фиксации в отчетном периоде, которыми помечены вершины $v_i(\mathcal{E}) \in V_1(\mathcal{E}), v_i(\Phi) \in V_2(\Phi)$ в кортежах, упорядочивающих моменты времени появления и исчезновения биективно соответствующего им явления b_{i_2} , совпадают;

в) интервалы времени между появлением и исчезновением «мягких» явлений b_{i_2} , занимающие в кортежах упорядочивания времени одинаковые позиции $\Delta t_{ij_1}(\mathcal{E}) = (t_{ij_1}(\mathcal{E}) - t_{ij_1}(\mathcal{E}))$ и $\Delta t_{ij_1}(\Phi) = (t_{ij_1}(\Phi) - t_{ij_1}(\Phi))$, а также интервалы времени $\Delta t_{ij_1}(\mathcal{E}) = (t_{ij_1}(\Phi) - t_{ij_1}(\Phi))$ и $\Delta t_{ij_1}(\Phi) = (t_{ij_1}(\Phi) - t_{ij_1}(\Phi))$ между повторным появлением после исчезновения «мягких» явлений b_{i_2} , равны между собой с заданной точностью ε ;

г) все степени нечеткого равенства $\rho_{i_2}(b_{i_2,j_1}^*(\mathcal{E}), b_{i_2,j_1}^*(\Phi))$ сравниваемых между собой значений одноименных «мягких» явлений в эталонной и фактической НДСС для одноименных по времени фиксаций, определяемые по (1), удовлетворяют следующему условию: « $\rho_{i_1}(a_{i_1,j_1}^*(\mathcal{E}), a_{i_1,j_1}^*(\Phi)) > 0,5$ ».

Правило сравнения 3. Степень нечеткого равенства $\rho(G_1(\mathcal{E}), G_2(\Phi))$ многослойных гиперграфов $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, определяющих сравниваемые между собой НДСС, которые соответственно описывают эталонный и фактический ТП, определяется по слабому звену результатов нечеткого сравнения значений одноименных в них пометок:

$$\rho(G_1, G_2) = \min_{i=1}^n (\min_{i_1=1}^{n(1)} \rho_{i_1}(a_{i_1,j_1}^*(\mathcal{E}), a_{i_1,j_1}^*(\Phi)), \min_{i_2=1}^{n(2)} \rho_{i_2}(b_{i_2,j_1}^*(\mathcal{E}), b_{i_2,j_1}^*(\Phi))),$$

где $n(1)$ и $n(2)$ - количество вершин в сравниваемых гиперграфах, которые помечены, соответственно, параметрами и «мягкими» событиями.

Следует отметить, что полученную таким образом оценку степени нечеткого равенства НДСС можно рассматривать как оценку достоверности проведенного прогноза, изменяющуюся на интервале [0-1]. Другими словами:

если $\rho(G_1(\mathcal{E}), G_2(\Phi)) = 0$, то можно считать, что прогноз не состоялся, иначе,

если $\rho(G_1(\mathcal{E}), G_2(\Phi)) < 0,5$, то вероятность достоверности полученного прогноза является низкой, иначе,

если $\rho(G_1(\mathcal{E}), G_2(\Phi)) \geq 0,5$, то вероятность достоверности полученного прогноза является высокой, иначе,

если $\rho(G_1(\mathcal{E}), G_2(\Phi)) = 1$, то полученный прогноз является достоверным.

Для оценки временной сложности выполнения операции нечеткого сравнения между собой различных НДСС докажем следующее утверждение.

Утверждение 2. Временная сложность оценки нечеткого равенства $\rho(G_1(\mathcal{E}), G_2(\mathcal{E}))$ многослойных гиперграфов $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ на основе оценок степеней нечеткого равенства между значениями одноименных параметров и мягких явлений, которыми помечены в них вершины и ребра, имеет следующий порядок:

$$[(n^2 + \sum_{i=1}^n n_{i_1}^2(i) + 2 \sum_{i=1}^n n_{i_1}(i) + m_{i_1}(i)) + (11(\sum_{i=1}^{n(1)} (n_{i_1}(i) + m_{i_1}(i)) + \sum_{i_2=1}^{n(2)} (n_{i_2}(1) + n_{i_2}(2)))].$$

Доказательство приводится в Приложении 2.

Построение прогнозов на различных стадиях наблюдения предвестниковых процессов подготовки возникновения аномальных ситуаций на объекте управления может быть основано на выполнении операции оценки нечеткого вложенного изоморфизма модели фактически протекающего в ней процесса подготовки в одну из эталонных моделей превестникового процесса подготовки, хранящихся в памяти интеллектуальной системы.

Правило сравнения 4. Нечеткая динамическая семантическая сеть, моделирующая динамику протекающего в ОС и на объекте управления процесса подготовки и определяемая многослойным гиперграфом $G_2(\Phi) = (V_2(\Phi), E_2(\Phi), v_0(\Phi))$, является нечетко вложено изоморфной в эталонную модель превестникового процесса, определяемую многослойным гиперграфом $G_1(\mathcal{E}) = (V_1(\mathcal{E}), E_1(\mathcal{E}), v_0(\mathcal{E}))$, если для нее выполняется следующее условие: « $(V_2(\Phi) \subset V_1(\mathcal{E})) \& (E_2(\Phi) \subset E_1(\mathcal{E}))$ » с точно-

стью до нечеткого равенства пометок одинаковых в них вершин и ребер.

В процессе построения различных прогнозов может также возникнуть необходимость сравнения между собой различных НДСС на предмет оценки имеющейся между ними аналогии.

Правило сравнения 5. Две произвольные НДСС, определяемые многослойными гиперграфами $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ являются аналогичными, если для них выполняются ниже следующие условия.

1. Соответствующие им многослойные гиперграфы $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ являются структурно эквивалентными с точностью до равенства или нечеткого равенства пометок одинаковых в них вершин и ребер.

Следует отметить, что пара ключевых вершин $v_o(\mathcal{E}) \in G_1(\mathcal{E})$ и $v_o(\Phi) \in G_2(\Phi)$ в сравниваемых между собой многослойных гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ может выбираться произвольно, главное чтобы они были помечены аналогичными между собой параметрами или «мягкими» явлениями. Для этого вначале фиксируется вершина $v_o(\mathcal{E}) \in G_1(\mathcal{E})$, например, определяемая множеством характеристик $X_o(\mathcal{E})$, а затем в гиперграфе $G_2(\Phi)$ ищется вершина $v_o(\Phi) \in G_2(\Phi)$, определяемая множеством характеристик $X_o(\Phi)$, которое обладает максимальной степенью сходства с множеством характеристик $X_o(\mathcal{E})$. В этом случае, степень аналогии $\beta(v_o(\mathcal{E}), v_o(\Phi))$ между пометками сравниваемых между собой вершин $v_o(\mathcal{E}) \in G_1(\mathcal{E})$ и $v_o(\Phi) \in G_2(\Phi)$ может определяться следующим образом [13]:

$$\beta(v_o(\mathcal{E}), v_o(\Phi)) = \frac{2|X_o(\mathcal{E}) \cap X_o(\Phi)|}{|X_o(\mathcal{E})| + |X_o(\Phi)|}, \quad (2)$$

где $|X_o(\mathcal{E})|$ - мощность множества $X_o(\mathcal{E})$.

Затем, относительно выбранных базовых вершин $v_o(\mathcal{E}) \in G_1(\mathcal{E})$ и $v_o(\Phi) \in G_2(\Phi)$, устанавливается факт - являются или не являются многослойные гиперграфы $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$ структурно эквивалентными или изоморфными с учетом заданного порога степени аналогичности между пометками вершин и ребер, занимающих в них одинаковые позиции.

2. Пометки каждой пары занимающих одинаковые позиции в гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и

$G_2(\Phi)$ вершин $v_i(\mathcal{E}) \in G_1(\mathcal{E})$ и $v_i(\Phi) \in G_2(\Phi)$, определяемых параметрическими событиями a_{i1} , должны иметь одинаковый характер динамики изменения их значений во времени. Другими словами, на сравниваемых между собой интервалах времени должна наблюдаться корреляционная зависимость между изменениями пометок вершин $v_i(\mathcal{E}) \in G_1(\mathcal{E})$ и $v_i(\Phi) \in G_2(\Phi)$, занимающих соответственно одинаковые позиции в гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, с положительным коэффициентом корреляции k_{i1} , равным не меньше заданного порога k_0 .

3. Для каждой пары вершин $v_i(\mathcal{E}) \in G_1$ и $v_i(\Phi) \in G_2$, занимающих одинаковые позиции во втором слое гиперграфов $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, если они помечены аналогичными между собой явлениями, то для степени их аналогичности $\beta(v_{i1}(\mathcal{E}), v_{i1}(\Phi))$, вычисляемой по (2), должно выполняться условие « $\beta(v_{i1}(\mathcal{E}), v_{i1}(\Phi)) > h$ », где h – заданный порог сравнения.

Следует отметить, что для повышения достоверности проводимых прогнозов порог допустимой аналогичности h может быть увеличен, опираясь на накопленный опыт прогнозирования или на данные, полученные экспертным путем.

4. Для каждой пары ребер $e_j(\mathcal{E}) \in G_1(\mathcal{E})$ и $e_j(\Phi) \in G_2(\Phi)$, занимающих одинаковые позиции во втором слое гиперграфов $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, если они определяются аналогичными пометками, то степень аналогичности данных пометок $\delta(e_j(\mathcal{E}), e_j(\Phi))$, при нечеткой форме представления в виде следующих пар $\langle \mu(e_{j,i4}^*(\mathcal{E}), T_{j2}(e_{j,i4}^*(\mathcal{E}))), i_4 = 1, 2, \dots, n^* ; j_2 = 1, 2, \dots, 5 \rangle$ и $\langle \mu(e_{j,i4}^*(\Phi), T_{j2}(e_{j,i4}^*(\Phi))) \rangle$, должна быть больше заданного порогового значения δ_0 и должно выполняться условие: $\langle T_{j2}(e_{j,i4}^*(\mathcal{E})) = T_{j2}(e_{j,i4}^*(\Phi)) \rangle$, где $e_{j,i4}^*(\mathcal{E})$ - количественные значения пометок ребер, которые они принимают на протяжении отчетного периода времени; n^* - количество значений пометок ребер, которые они имеют на протяжении отчетного периода времени. В этом случае, величина степени аналогичности пометок ребер вычисляется следующим образом:

$$\delta(e_j(\mathcal{A}), e_j(\mathcal{B})) = \min_{i=1}^{n^*} (\mu(e_{j,i4}^*(\mathcal{A})) \leftrightarrow \mu(e_{j,i4}^*(\mathcal{B}))).$$

При четко заданных значениях пометок ребер, например, если они определяются короткем времени появления и исчезновения мягких явлений, аналогичных друг другу, то при выполнении условия равенства значений этих пометок в одинаковых позициях короткежа с заданной точностью ε , степень аналогичности ребер первого слоя сравниваемых между собой гиперграфов, т.е. в графах $G_1(\mathcal{A})$ и $G_2(\mathcal{B})$ вычисляется по (2).

Заключение

Резюмируя вышеизложенное, отметим:

- предложенная в работе модель представления знаний в виде НРСС обеспечивает возможность адекватного описания и контроля многофакторных динамических процессов подготовки возникновения аномальных ситуаций, и позволяет предусмотреть принятие различных превентивных мер, направленных на устранение связанных с ними последствий;

- построение среднесрочных и краткосрочных прогнозов на основе НРСС, связано с выполнением различных операций сравнения сформированных в реальном времени моделей фактических многофакторных динамических ТП с эталонными моделями, построенными на основе ранее накопленного опыта, отражающего процесс подготовки прогнозируемого события в исследуемой предметной области;

- проведенный в работе анализ показал, что временная сложность предложенных в ней способов сравнения между собой различных НРСС носит полиномиальный характер, что позволяет решать задачу на ПЭВМ;

- важной особенностью НРСС является возможность построения достоверных прогнозов, как на ранней стадии подготовки прогнозируемых в ОС и на объекте управления событий, так и в среднесрочном, и краткосрочном периодах их возникновения. Это обеспечивается путем оценки вложенного нечеткого изоморфизма НДСС в эталонную модель ТП, описывающую динамику условий возможного ее перехода в ожидаемое состояние.

Приложение 1

Доказательство Утверждения 1

1. Примем за основу оценки временной сложности одну операцию сравнения пометок при определении структурной эквивалентности гиперграфов $G_1(\mathcal{A})$ и $G_2(\mathcal{B})$ и графов $G_i(\mathcal{A})$ и $G_i(\mathcal{B})$, а также оценки равенства с заданной точностью ε между значениями одноименных пометок в данных графах.

2. Учитывая, что гиперграфы $G_1(\mathcal{A})$ и $G_2(\mathcal{B})$ являются помеченными, временная сложность определения их структурной эквивалентности на первом этапе сравнения между собой эталонной и фактической НРСС имеет порядок $[n^2]$.

3. При сравнении НРСС между собой на втором этапе с заданной точностью ε пометок вершин и ребер в графах $G_i(\mathcal{A})$ и $G_i(\mathcal{B})$, характеризующих динамику одинаковых параметров a_{i1} , выполняются следующие основные операции:

а) операция оценки структурной эквивалентности графов $G_i(\mathcal{A})$ и $G_i(\mathcal{B})$, соответствующих паре одинаковых вершин в гиперграфах G_1 и G_2 , имеет следующий порядок временной сложности e_2 , так как в этом случае сравниваются помеченные графы, где e_1 - количество вершин в i -м графе.

Следовательно, временная сложность оценки структурной эквивалентности пары графов e_3 , которыми помечены соответственно одноименные вершины в гиперграфах $G_1(\mathcal{A})$ и $G_2(\mathcal{B})$, будет

иметь порядок $[\sum_{i=1}^n n_{i1}^2(i)]$;

б) в свою очередь, каждая операция сравнения пометок одинаковых вершин и ребер в графах $G_i(\mathcal{E})$ и $G_i(\Phi)$, соответствующих паре одинаковых вершин и ребер в гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, с заданной точностью ε сводится к выполнению следующих двух операций:

- определение разности между значениями параметра и временем начала отсчета его изменений, зафиксированными в одной и той же позиции в графах $G_i(\mathcal{E})$ и $G_i(\Phi)$;
- сравнение полученных разностей с допустимым значением ε отклонения.

Следовательно, допуская, что операции сравнения и разности имеют одинаковую сложность, временная сложность сравнения между собой значений пометок вершин и ребер в графах $G_i(\mathcal{E})$ и $G_i(\Phi)$ с заданной точностью ε , будет иметь порядок $[2(n_{i1}(i) + m_{i1}(i))]$.

Отсюда, временная сложность сравнения пометок одинаковых вершин и ребер во всех графах $G_i(\mathcal{E})$ и $G_i(\Phi)$ с заданной точностью ε будет иметь порядок $[2\sum_{i=1}^n (n_{i1}(i) + m_{i1}(i))]$.

4. Из пп.1-3 с очевидностью следует, что временная сложность сравнения между собой НДСС с заданной точностью пометок вершин и ребер имеет порядок:

$$[n^2 + \sum_{i=1}^n n_{i1}^2(i) + 2\sum_{i=1}^n (n_{i1}(i) + m_{i1}(i))].$$

Таким образом, Утверждение 1 доказано.

Приложение 2

Доказательство Утверждения 2

1. Примем за основу оценки временной сложности одну операцию сравнения при определении степеней нечеткого равенства пометок вершин и ребер многослойных гиперграфов $G_1 = (V_1, E_{10})$ и $G_2 = (V_2, E_2)$, которые определяются характеристиками параметров и мягких явлений. Тогда, согласно (1) число операций сравнения, которые выполняются в процессе определения одной степени нечеткого равенства с учетом допущения, что операции сравнения и разности имеют одинаковую сложность, в худшем случае, определяется величиной, равной 11, в которой учитывается 5 сравнений, связанных с реализацией одной операции нечеткой эквивалентности.

2. Пусть число вершин в гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, которые помечены параметрами a_{i1} , определяется величиной $n(1)$, а число вершин и ребер в каждом i -м графе первого слоя, описывающем динамику изменения этого параметра, соответственно, $n_{i1}(i)$ и $m_{i1}(i)$. Отсюда, общее количество вершин и ребер, имеющих в попарно сравниваемых графах $G_i(\mathcal{E}) \in G_1(\mathcal{E})$ и $G_i(\Phi) \in G_2(\Phi)$, будет определяться величиной

$$\sum_{i=1}^{n(1)} (n_{i1}(i) + m_{i1}(i)).$$

Следовательно, согласно п.1 временная сложность оценки степени нечеткого равенства пометок одинаковых вершин и ребер в графах $G_i(\mathcal{E}); G_i(\Phi), i = 1, n$ имеет порядок: $[11\sum_{i=1}^{n(1)} (n_{i1}(i) + m_{i1}(i))]$.

3. Пусть число вершин в многослойных гиперграфах $G_1(\mathcal{E})$ и $G_2(\Phi)$, которые помечены «мягкими» явлениями, определяется величиной $n(2)$. Тогда согласно п.1 с учетом того, что количество пометок, определяющих динамику поведения одного мягкого явления b_{i2} складывается из $n_{i2}(1)$ пар пометок, определяющих нечеткое описание соответствующих ему характеристик $x_{i3} \in X_{i2}, i_3 = 1, 2, \dots, n_{i2}(1)$ и $n_{i2}(2)$ пар меток, с помощью которых определяются элементы в кортеже отсчета времен появления и исчезновения этого явления, временная сложность определения

нечеткого равенства между собой пометок вершин, определяемых в гиперграфах $G_1(\Theta)$ и $G_2(\Phi)$ одними и теми же мягкими явлениями, будет иметь порядок: $[11 \sum_{i2=1}^{n(2)} (n_{i2}(1) + n_{i2}(2))]$.

4. Из пп.1-3 и п.2 Утверждения 1 с очевидностью следует, что временная сложность оценки степени нечеткого равенства сравниваемых между собой НРСС имеет следующий порядок:

$$[(n^2 + \sum_{i=1}^n n_{i1}^2(i) + 2 \sum_{i=1}^n n_{i1}(i) + m_{i1}(i)) + (11 \sum_{i=1}^{n(1)} (n_{i1}(i) + m_{i1}(i)) + \sum_{i2=1}^{n(2)} (n_{i2}(1) + n_{i2}(2)))]$$

Таким образом, Утверждение 2 доказано.

Литература

1. Агроник А.Ю., Талалаев А.А., Фраленко В.П., Хачумов В.М., Шишкин О.Г. Анализ систем проектирования технологических цепочек и процессов // *Онтология проектирования*. 2016. №3. С. 255-269.
2. Методы и модели автоматического синтеза технологических процессов Латышев А.В., Ромакин В.А., Хачумов В.М., Хачумов М.В. основанного на знаниях // *Программные системы: теория и приложения*. 2016. Т.7. №3. С. 25-43.
3. Хачумов М.В. Метод анализа и сравнения иерархических технологических процессов в задачах персонализированного лечения пациентов // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. №9. С. 457-462.
4. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход (AIMA). М.: Вильямс. 2005. 1424 с.
5. Максимов В.И., Корноушенко Е.К. Аналитические основы применения когнитивного подхода к решению слабоструктурированных задач // *Труды ИПУ РАН*. Том 2. 1999. С. 95-109.
6. Емельянова Ю.Г. Разработка методов когнитивного отображения состояний динамических систем реального времени // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2016. №3. С. 21-30.
7. Абрамова Н.А., Федотов А.А. О развитии аналитического подхода к определению внешнего поведения моделей на основе динамических когнитивных карт // *Труды IX Международной конференции "Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций"*. М.: ИПУ РАН. 2009. С.23-40.
8. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Нечеткие динамические семантические сети для представления знаний интеллектуальных систем // *Автоматика и телемеханика*. 2000. №3. С.107-110.
9. Зыков А.А. Гиперграфы // *Успехи математической науки*. 1974. Т.29. №6. С. 89-154.
10. Заде Л. Логико-лингвистическая переменная и ее применение для принятия приближенных решений. М.: Мир. 1976. 168 с.
11. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Структура процедурного представления знаний интегрального робота. 1. Расплывчатые семантические сети // *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*. 1988. №6. С. 119-124.
12. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука. 1990. 272 с.
13. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Определение аналогии между ситуациями проблемной среды для переноса накопленного опыта поведения // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 1997. №5. С. 84-87.

Мелехин Владимир Борисович. Заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем ВО «Дагестанский государственный технический университет». Окончил Дагестанский политехнический институт в 1976 году. Доктор технических наук, профессор. Количество печатных работ: 116 и пять монографий. Область научных интересов: интеллектуальные системы, управление сложными социальными и экономическими системами. E-mail: Pashka1602@rambler.ru

Хачумов Вячеслав Михайлович. Заведующий лабораторией «Методы интеллектуального управления» ИСА ФИЦ ИУ РАН. Окончил Ленинградский кораблестроительный институт в 1971 году. Доктор технических наук, профессор. Количество печатных работ: 200. Область научных интересов: вычислительные алгоритмы, распознавание образов, методы обработки сигналов и изображений, искусственный интеллект. E-mail: vmh48@mail.ru

Dynamic model of knowledge representation in intelligent control systems of complex technological processes

V.B. Melekhin, V.M. Khachumov

Abstract. The original model of the dynamic knowledge presentation in intelligent control systems of complex technological processes and forecasting of abnormal situations in the form of fuzzy marked growing semantic network is designed. The proposed model allows to adequately describe the complex multivariable dynamic technological processes and on this basis to control them in the process of the

implementation by comparing the actual and reference dynamic behavioral models of the control object in time. The rules of the comparison of different fuzzy growing semantic networks are developed, which allow to realize automatic control of the complex technological processes in an unstable environment.

Keywords: intelligent control system, dynamic technological process, abnormal situation, fuzzy semantic network.

References

1. Agronik, A.Yu., A.A. Talalaev, V.P. Fralenko, V.M. Khachumov and O.G. Shishkin. 2016. Analiz sistem proektirovaniya tekhnologicheskikh cepochek i processov [Analysis of systems for technological chains and processes designing]. *Ontologiya proektirovaniya* [Ontology of Designing] 3:255–269.
2. Latyshev, A.V., V.A. Romakin, V.M. Khachumov and M.V. Khachumov. 2016. Metody i modeli avtomaticheskogo sinteza tekhnologicheskikh processov, osnovannogo na znaniyah [Methods and models of automatic knowledge-based synthesis of technological processes]. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya* [Program systems: theory and applications] 3(30):25–43.
3. Khachumov, M.V. 2016. Metod analiza i sravneniya ierarhicheskikh tekhnologicheskikh processov v zadachah personificirovannogo lecheniya pacientov [The method of analysis and comparison of hierarchical processes in the task of personalized treatment of patients]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies] 9:457–462.
4. Russel, S., P. Norvig. 2005. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podhod (AIMA)* [Artificial intelligence: modern approach (AIMA)]. Moscow: Williams. 1424 p.
5. Maksimov, V.I., E.K. Kornoushenko. 1999. Analiticheskie osnovy primeneniya kognitivnogo podhoda k resheniyu slabostrukturirovannykh zadach [The analytical basis of the cognitive approach for the solution of semi-structured problems]. *Trudy IPU RAN. Tom 2* [Works ICS RAS. Vol. 2]. Moscow: ICS RAS. 95–109.
6. Emeliyanova, Yu.G. 2016. Razrabotka metodov kognitivnogo otobrazheniya sostoyaniy dinamicheskikh sistem real'nogo vremeni [Development of cognitive representation methods for real time dynamic systems]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij* [Artificial intelligence and decision-making] 3:21–30.
7. Abramova, N.A., A.A. Fedotov. 2009. O razvitii analiticheskogo podhoda k opredeleniyu vneshnego povedeniya modelej na osnove dinamicheskikh kognitivnykh kart [On the development of the analytical approach to determination of external behavior of models based on dynamic cognitive maps]. *Trudy IX Mezhdunarodnoj konferencii "Kognitivnyy analiz i upravlenie razvitiem situacij"* [Proceedings of IX International conference "Cognitive analysis and situations control"]. Moscow: ICS RAS. 23–40.
8. Bershteyn, L.S., V.B. Melekhin. 2000. Nechetkie dinamicheskie semanticheskie seti dlya predstavleniya znaniy intellektual'nykh sistem [Fuzzy dynamic semantic networks for representation of knowledge in intelligent systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control] 3:107–110.
9. Zykov, A.A. 1974. *Gipergrafy* [The Hypergraphs]. *Uspekhi matematicheskoy nauki* [Achievements of mathematical science] 6(180):89–154.
10. Zade, L. 1976. Logiko-lingvisticheskaya peremennaya i ee primeneniye dlya prinyatiya priblizhennykh reshenij [Logical-linguistic variable and its application for acceptance of approximate solutions]. Moscow: World. 168 p.
11. Bershteyn, L.S., V.B. Melekhin. 1988. Struktura procedurnogo predstavleniya znaniy integral'nogo robota. 1. Rasplychatye semanticheskie seti [The structure of a procedural knowledge representation of the integral robot. 1. Fuzzy semantic network]. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [News of Academy of Sciences of the USSR. Technical Cybernetics] 6:119–124.
12. Melihov, A.N., L.S. Bershteyn and S.Ya. Korovin. 1990. Situacionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoj logikoj [Situational advising systems with fuzzy logic]. Moscow: Science. 272 p.
13. Bershteyn, L.S., V.B. Melekhin. 1997. Opredeleniye analogii mezhdru situatsiyami problemnoy sredy dlya perenosa nakoplenogo opyta povedeniya [The definition of analogy between situations of the problem environment for transfer of the accumulated experience of behavior]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems.] 5:84–87.

Melekhin Vladimir Borisovich. Head of the department of software of the computing machinery and automated systems FSBEI of HE "Dagestan State Technical University". He graduated from the Dagestan Polytechnic Institute in 1976; Doctor of the technical sciences, professor. Author of 116 publications in journals included in the list of Higher Attestation Commission of the Russian Federation and 5 monographs, including 2 in the field of intellectual systems and 3 in the field of building production management in unstable conditions of the economic ambience. Research interests: intellectual robots, complex social and economic systems control.

Khachumov Vyacheslav. Head of the Laboratory "Intelligent Control Methods" of the Institute for System Analysis, Federal Research Centre "Information and Control" of the Russian Academy of Sciences. He graduated from the Leningrad Shipbuilding Institute in 1971. Doctor of Technical Sciences, Professor. Author of over 200 publications. Research interests: computational algorithms, pattern recognition, signal and image processing, artificial intelligence.