УДК 004.82

Формальная спецификация свойств баз нечетких знаний Мамдани на основе метаграфа

М. Ю. Терновой, Е. С. Штогрина
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина

В работе рассмотрено представление базы нечетких знаний Мамдани в виде метаграфа. Проведен анализ свойств базы нечетких знаний для повышения достоверности нечеткого логического вывода. Сформулированы определения свойств базы нечетких знаний Мамдани: неизбыточности, лингвистической непротиворечивости, отсутствия зацикливания и лингвистической полноты, базы нечетких знаний Мамдани. Определены требования к структуре метаграфа, соответствующего базе нечетких знаний Мамдани, для случаев, когда база нечетких знаний является неизбыточной, лингвистически непротиворечивой, не содержит зацикливания иявляется лингвистически полной. Предложено проводить статическую верификацию баз нечетких знаний на основе структуры метаграфа, а также его графического представления.

Ключевые слова: *база нечетких знаний Мамдани, лингвистическаяпеременная, метаграф, избыточность, противоречивость, зацикливание, полнота.*

У роботі розглянуто подання бази нечітких знань Мамдані у вигляді метаграфа. Проведено аналіз властивостей бази нечітких знань для підвищення достовірності нечіткого логічного виведення. Сформульовано визначення властивостей бази нечітких знань Мамдані: ненадлишковості, лінгвістичної несуперечливості, відсутності зациклювання та лінгвістичної повноти бази нечітких знань Мамдані. Визначено вимоги до структури метаграфа, який подає базу нечітких знань Мамдані, для випадків, коли база нечітких знань є ненадлишковою, лінгвістично несуперечливою, не містить зациклювання та є лінгвістично повною. Запропоновано проводити статичну верифікацію баз нечітких знань на основі структури метаграфа, а також його графічного подання.

Ключові слова: *база нечітких знань Мамданф, лінгвістична змінна, метаграф, надлишковість, протиріччя, зациклювання, повнота.*

The paper describes Mamdani fuzzy knowledge base representation in the form of a metagraph. The fuzzy knowledge base properties which have an influence on confidence of fuzzy inference are analyzed. The definitions of non-redundant, linguistic non-contradicted, without circularity and linguistic complete Mamdani fuzzy knowledge base are given. The metagraph structure requirements corresponding to non-redundant, linguistic non-contradicted and linguistic complete Mamdani fuzzy knowledge base are defined. Mamdani fuzzy knowledge base properties static verification based on metagraph structure analysis is proposed.

Key words: *Mamdani fuzzy knowledge base, linguistic variable, metagraph, redundancy, contradictoriness, circularity, completeness.*

Введение

Базы знаний (БЗ) получили широкое распространение как составная часть экспертных систем для поддержки принятия решений в различных организациях и предприятиях. При лингвистической неопределенности и необходимости оперирования как количественной, так и качественной информацией наиболее часто используются такой вид БЗ, как базы нечетких знаний (БНЗ).

Эффективность работы экспертных систем, основанных на БНЗ, зависит от способа хранения (представления) БНЗ и методов логического вывода [1 – 5]. При создании и наполнении баз знаний (БЗ) в них могут появляться аномалии. Аномалии указывают на то, что в БЗ существуют проблемы, которые могут привести к получению неправильных выводов, либо о невозможности выполнить логический вывод вообще. В работах [6, 7] описаны аномалии, которые могут присутствовать в продукционных БЗ, а именно избыточность, противоречивость, зацикливание и неполнота. При отсутствии описанных аномалий говорят, что БЗ обладает свойствами неизбыточности, непротиворечивости, полноты и в ней отсутствует зацикливание [8 – 27]. В данной работе рассматриваются эти свойства с учетом особенностей БНЗ Мамдани.

Для повышения достоверности вывода при использовании БНЗ, необходимо чтобы она обладала соответствующим набором свойств из описанных выше. Существует множество методов для верификации БЗ. Для выявления аномалий и определения обладает ли продукционная БЗ определенным свойством рассматривается сведение БЗ к графовым структурам [19 – 21], бинарным диаграммам решений [22, 23], таблицам принятия решений [24], матричным представлениям [25, 26]. Данные представления не всегда взаимно-однозначно соответствуют БЗ и в большинстве случаев не учитывают особенности БНЗ.

В работах [3 – 5] предлагается и подробно описывается представление и использование БНЗ в виде метаграфа. Такое представление позволяет взаимно-однозначно описывать правила, а графическое представление метаграфа позволяет эксперту в визуальной форме работать с БНЗ как на этапе наполнения и верификации БЗ, так и на этапе ее использования.

В данной работе проводится проверка описанных выше свойств БНЗ на основе метаграфа, который ее представляет. Использование метаграфа позволяет повысить эффективность статической верификации БНЗ за счет структуризации нечетких знаний, а также визуализации метаграфа.

Основная часть

Для того чтобы рассмотреть свойства БНЗ, а также предложить дальнейшую их проверку с помощью метаграфа, выпишем определение БНЗ и метаграфа. Отметим, что в дальнейшем изложении в данной работе под БНЗ подразумеваются БНЗ Мамдани.

Определение 1. БНЗ Мамдани представляет собой объединение множеств $P \cup X$:

1) $X = \left\{X_i | i = \overline{1, N_X}\right\}$ – множество лингвистических переменных (ЛП), где X_i - имя ЛП, N_X - количество ЛП, и каждая ЛП содержит терм-множество $T_i = \left\{t_i^k \mid k = \overline{1, N_i}\right\}$, где t_i^k - терм, который имеет функцию принадлежности (ФП) $\mu_{t_i^k}$, где k - номер терма, N_i - количество термов ЛП X_i;

2) $P = \left\{P_g \mid g = \overline{1, N_P}\right\}$ – множество правил «Если - То», где N_P - количество правил БНЗ. P_g - это обозначение для правил вида (1):

$$\left(P_l^z\right)_j = ЕСЛИ \left(X_{j_1} = t_{j_1}^{k_1}\right) И \left(X_{j_2} = t_{j_2}^{k_2}\right) \; И ... И \left(X_{j_{n_j}} = t_{j_{n_j}}^{k_{n_j}}\right) ТО \left(X_l = t_l^z\right), \qquad (1)$$

где $\left(P_l^z\right)_j$ - j-е правило для определения z-го терма ЛП с идентификатором l, в котором X_{j_s} - ЛП, которая принимает значение $t_{j_s}^{k_s}$; $s = \overline{1, n_j}$ - номер ЛП в левой части j-го правила, n_j - количество ЛП, которые находятся в левой части j-го правила.

Для сокращения записи введем обозначения левой и правой части правила P_g:

$$P_g = \left(P_g^A, P_g^C\right),$$

где $P_g^A = \left\{t_{j_s}^{k_s} \mid s = \overline{1, n_j}\right\}$ - множество термов, которые входят в левую часть правила;

$P_g^C = t_l^z$ - терм, который является результатом правила.

Отметим, что рассматривается БНЗ, которая сформирована для определения одной ЛП, которую будем называть результирующей и обозначать X_{rez}. ЛП, значения которых определяется с помощью фаззификации или сразу задаются в качественном виде, будем называть входными и обозначать $X^{input} = \left\{X_i^{input} | i = \overline{1, N_{X^{input}}}\right\}$. Для входных переменных не существует правил их определяющих.

Определение 2. Частичная БНЗ – это БНЗ для определения одной ЛП, включающая в себя только такие правила, результатами которых являются термы данной ЛП. При этом такую ЛП будем называть ЛП верхнего уровня, а ЛП, входящие в левые части правил, будем называть ЛП нижнего уровня.

Определение 3. Метаграф – это структура данных, которая определяется тройкой множеств $S = \langle V, M, E\rangle$, где $V = \left\{v_r | r = \overline{1, N_V}\right\}$ – порождающее множество (множество вершин метаграфа), $M = \left\{m_q | q = \overline{1, N_M}\right\}$ – множество метавершин, $E = \left\{e_h | h = \overline{1, N_E}\right\}$ – множество ребер, где N_V – количество вершин метаграфа, N_M – количество метавершин, N_E – общее количество ребер в метаграфе.

Метавершина метаграфа – определяется как множество вершин $m_q = \left\{v_r | v_r \in V, r = \overline{1, N_{m_q}}\right\}$, где $N_{\mathrm{m_q}}$ – количество вершин, входящих в метавершину m_q. Если две или больше метавершины соответствуют одному и тому же множеству вершин, то такие метавершины считаются одинаковыми и рассматривается только одна из таких метавершин.

Для упрощения дальнейшей подачи материала введем понятие узла метаграфа. Для этого множество вершин представим в виде разбиения на одноэлементные подмножества, каждое их которых содержит одну вершину. Тогда узел метаграфа можно представить как $mv \in \bigcup_r \{v_r\} \cup M$. Таким образом, узел метаграфа – это метавершина или одноэлементное множество содержащее вершину. Ребро метаграфа в общем случае определяется как $e_h = \{mv_h^{out}, mv_h^{in}\}$. Если ребро ориентированное, то будет использоваться термин дуга и записываться $e_h = (mv_h^{out}, mv_h^{in})$, где mv_h^{out} – узел, из которого исходит дуга e_h, mv_h^{in} – узел, в который заходит дуга e_h. При дальнейшей подаче материала если указано, что дуга исходит/заходит из/в вершину v_r, это означает, что дуга исходит/заходит из/в узел, соответствующий одноэлементному множеству, содержащему данную вершину, т.е. $mv_h^{out} = \{v_r\} / mv_h^{in} = \{v_r\}$.

Определение 4. Путь в ориентированном метаграфе S из узла mv_p в узел mv_q – это последовательность дуг $Path(mv_p, mv_q) = (e_1, e_2, ..., e_n)$, такая что $\forall i : mv_i^{in} \cap mv_{i+1}^{out} \neq \varnothing$.

Определение 5. Путь $Path(mv_p, mv_q)$, в котором $mv_p \cap mv_q \neq \varnothing$ называется циклом.

Определение 6. Будем называть метаграфом, представляющим БНЗ Мамдани, такой метаграф $S^/ = \langle V, M, E \rangle$, который удовлетворяет следующим условиям:

1. Каждая вершина $v_r = v(t_i^k)$ метаграфа $\mathrm{S}^/$ соответствует терму ЛП t_i^k.
2. Каждая метавершина $\mathrm{m_g} = \{v_r \mid r = \overline{1, n_g}\}$ метаграфа $\mathrm{S}^/$ соответствует P_g^A - левой части правила P_g. Метавершина $\mathrm{m_g}$ содержит в себе вершины, которые взаимно-однозначно соответствуют термам, входящим в P_g^A.
3. Каждая дуга e_g метаграфа $\mathrm{S}^/$, соответствует правилу P_g БНЗ. Дуга $e_g = (m_g, \{v_r\})$ исходит из метавершины m_g и заходит в вершину $\mathrm{v_r} = \mathrm{v}(t_l^z)$, которая соответствует терму $t_l^z = P_g^C$.

Графическое представление метаграфа позволяет наглядно осуществлять анализ свойств БНЗ, тем самым повышая эффективность статической верификации БНЗ экспертом, а также коррекции БНЗ для устранения аномалий. После описания каждого свойства приведем графическое представление метаграфа, представляющего БНЗ Мамдани, с примерами невыполнения данных свойств.

Графическое представление части метаграфа, которая соответствует правилу $(P_l^z)_j$, определенного формулой (1), представлено на рис. 1.

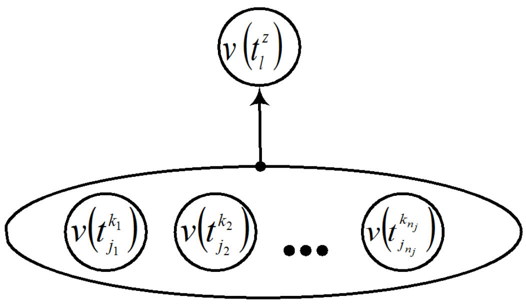

Рисунок 1. Графическое представление части метаграфа, соответствующей правилу $\left(P_l^z\right)_j$

На множестве вершин V зададим отношение $Q=\left\{\left(v_p, v_q\right) \mid \left(v_p, v_q \in V, v_p = v\left(t_i^k\right), v_q = v\left(t_i^a\right)\right) \wedge \left(t_i^k, t_i^a \in T_i\right)\right\}$, где $\left(t_i^k, t_i^a \in T_i\right)$ означает, что t_i^k, t_i^a являются термами X_i. Легко видеть, что данное отношение Q является отношением эквивалентности, т.к. оно является рефлексивным, симметричным и транзитивным. Тогда, классом эквивалентности, порожденным $v_p = v\left(t_i^k\right)$, будет множество вершин метаграфа, которые соответствуют термам одной ЛП X_i, $\lfloor v_p \rfloor_Q = \left\{v_q \in V \mid v_p Q v_q\right\}$. Для упрощения записи такой класс эквивалентности в дальнейшем будем обозначать как V_i ($V_i = \lfloor v_p \rfloor_Q$), где i - номер ЛП X_i. Фактор-множеством множества всех вершин метаграфа V по отношению эквивалентности Q будет множество $V/Q = \left\{V_i \mid i = \overline{1, N_X}\right\}$ всех классов эквивалентности. Элементами фактор-множества будут классы эквивалентности, каждый из которых будет содержать вершины, соответствующие термам только одной ЛП. Фактор-множество является разбиением множества вершин метаграфа $V = \bigcup\limits_i V_i$ и $\forall i \neq j : V_i \cap V_j = 0$. Мощность фактор-множества равна количеству ЛП N_X в БНЗ.

Множество вершин, которые соответствуют термам результирующей ЛП, будем называть результирующими вершинами. Исходя из введенного в начале статьи условия, в БНЗ будет всего одна результирующая ЛП. Все результирующие вершины будут содержаться в одном классе эквивалентности, который будем называть классом эквивалентности результирующих вершин V_{rez}. Вершины, соответствующие термам входных ЛП, будем называть входными вершинами. В отличие от результирующих вершин, в метаграфе $S^{/}$ будет существовать несколько классов эквивалентности входных вершин, которые будем обозначать V_i^{input}.

Исходя из описанного выше, для метаграфа $S^{/}$, который представляет БНЗ Мамдани, будут справедливы следующие свойства:

1. Не может содержать:

   1.1. Дуг, которые исходят из вершины, т.е. полустепень исхода вершины всегда равна нулю

$$\forall mv_h = \{v_r\} : \deg^-(mv_h) = 0 .$$

   1.2. Дуг, которые заходят в метавершину, т.е. полустепень захода метавершины равна нулю

$$\forall mv_h = m_g : \deg^+(mv_h) = 0 .$$

   1.3. Метавершин с нулевой полустепенью исхода, т.е. $\forall mv_h = m_g : \deg^-(mv_h) > 0$. Это означает, что для любой метавершины существует хотя бы одна дуга, которая соединяет ее с какой-то вершиной

$$\forall m_g \in M : \exists e_h = (m_g, \{v_r\}).$$

2. Обязательно содержит вершины, которые не включены ни в одну метавершину (это все результирующие вершины) $\exists V_{rez} = \{v_r | \forall g : v_r \notin m_g\}$.

На рис.2 продемонстрировано графическое представление метаграфа, который не соответствует БНЗ Мамдани.

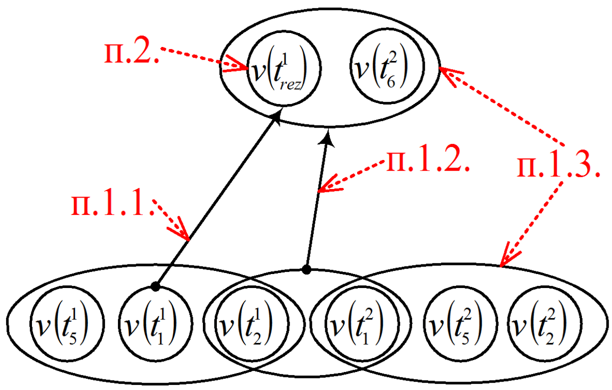

Рисунок 2. Пример метаграфа $S^{/}$, который не соответствует БНЗ Мамдани

Поскольку при представлении БНЗ в виде метаграфа в нем отображены все термы ЛП и все правила, присутствующие в БНЗ, то метаграф $S^{/}$ имеет такие свойства:

1. Количество классов эквивалентностей вершин равно количеству ЛП БНЗ $N_{V_i} = N_X$.
2. Количество вершин в метаграфе равно сумме количеств термов всех ЛП, которые входят в БНЗ $N_V = \sum_{i=1}^{N_X} N_i$.
3. Количество дуг в метаграфе равно количеству правил $N_E = N_P$.
4. Количество метавершин в метаграфе не больше, чем количество правил $N_M \le N_P$.

Избыточность БНЗ

Под избыточной БНЗ в работах [6 – 8, 11] понимают такую, в которой содержатся правила, дублирующие друг друга.

В работе [8] указывается, что наличие одинаковых правил при автоматизированном построении БНЗ может свидетельствовать не о избыточности, а о необходимости усиления повторяющегося правила, либо о модификации данных правил. Также следует отметить, что в работах [9, 10, 15] рассматривается понятие схожести правил, при котором одинаковыми считаются правила, если их мера схожести не ниже заданного порога. Такие правила также должны удаляться из БНЗ при проверке на избыточность за исключением выше описанного случая.

В работах [6, 7, 11], как вносящие избыточность, также относят правила, в которых при одинаковых заключениях присутствует включение условий. Сюда же относят случаи с присутствием невыполнимого правила и неиспользуемым консеквентом.

Ниже введем определение неизбыточной БНЗ, которого будем придерживаться в дальнейшем изложении.

Определение 7. БНЗ будем называть неизбыточной, если выполняются следующие условия:

1. Отсутствуют дубликаты правил, т.е. в БНЗ не существует правил с одинаковыми условиями и одинаковыми заключениями

$$\neg\exists P_i, P_j : (P_i^A = P_j^A) \wedge \left(P_i^C = P_j^C\right) \wedge \left(i \neq j\right).$$

2. Отсутствует включение условий, т.е. в БНЗ не существует правил с одинаковыми результатами, таких, что левая часть некоторого правила является подмножеством левой части другого правила

$$\neg\exists P_i, P_j : \left(P_i^C = P_j^C\right) \wedge (P_i^A \subset P_j^A).$$

3. Отсутствуют неиспользуемые термы не результирующей ЛП. В БНЗ для любого терма каждой не результирующей ЛП существует хотя бы одно правило, в левую часть которого он входит

$$\forall t_i^k \in T_i : \left(X_i \neq X_{rez}\right) \Rightarrow \left(\exists P_q : \left(t_i^k \in P_q^A\right)\right).$$

4. Отсутствуют невыполнимые правила.

   a. Если ЛП является входной, то ни для одного ее терма не существует правила, в котором терм данной ЛП будет результатом

$$\forall t_i^k \in T_i : (X_i \in X^{input}) \Rightarrow (\neg\exists P_q : t_i^k = P_q^C).$$

   b. Если ЛП не является входной, то для каждого ее терма должно существовать хотя бы одно правило, в котором данный терм является результатом

$$\forall t_i^k \in T_i : (X_i \notin X^{input}) \Rightarrow (\exists P_q : t_i^k = P_q^C).$$

При помощи анализа структуры метаграфа можно провести статическую верификацию БНЗ и определить является ли БНЗ неизбыточной в определенном выше смысле. Особенности структуры метаграфа, соответствующего неизбыточной БНЗ сформулированы ниже в виде утверждения.

Утверждение 1.

БНЗ неизбыточна, т.т.т.к. метаграф $S^{/}$, которым она представлена, имеет следующие свойства:

1. Отсутствуют кратные дуги

$$\neg\exists e_a, e_b : \left(e_a = \left(m_g, \{v_p\}\right)\right) \wedge \left(e_b = \left(m_g, \{v_p\}\right)\right) \wedge (a \neq b).$$

2. Отсутствуют метавершины, содержащие подмножество вершин, которое в свою очередь соответствует другой метавершине, и эти две метавершины соединены дугами с одной и той же вершиной

$$\neg\exists m_g, m_q : \left(e_a = \left(m_g, \{v_r\}\right)\right) \wedge \left(e_b = \left(m_q, \{v_r\}\right)\right) \wedge \left(m_q \subset m_g\right).$$

3. Если вершина не принадлежит к классу эквивалентности результирующей вершины, то она должна принадлежать метавершине

$$\forall v_p : \left(v_p \notin V_{rez}\right) \Rightarrow \exists m_g : \left(v_p \in m_g\right).$$

4. В классе эквивалентности вершин или все вершины не имеют заходящих дуг, или все имеют хотя бы одну заходящую дугу

$$\forall mv_p = \{v_p\}, v_p \in V_i : \begin{cases} \deg^+\left(mv_p\right) = 0 \Rightarrow \neg\exists mv_q = \{v_q\}, v_q \in V_i : \deg^+\left(mv_q\right) > 0 \\ \deg^+\left(mv_p\right) > 0 \Rightarrow \neg\exists mv_q = \{v_q\}, v_q \in V_i : \deg^+\left(mv_q\right) = 0 \end{cases}.$$

На рис.3 продемонстрировано графическое представление метаграфа, соответствующего БНЗ Мамдани, в которой присутствует избыточность.

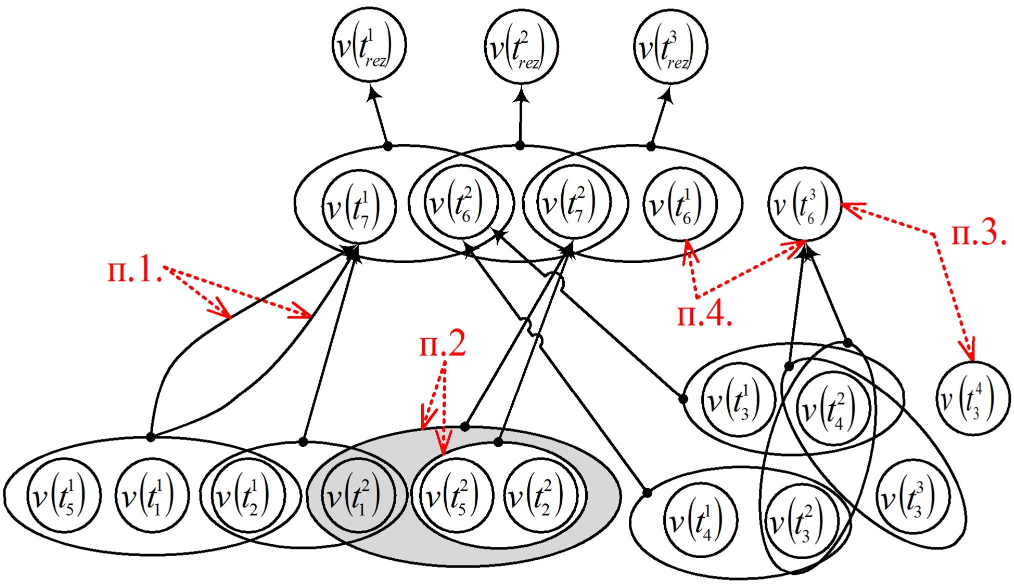

Рисунок 3. Пример метаграфа $S^{/}$, соответствующего БНЗ Мамдани, в которой присутствует избыточность

Непротиворечивость БНЗ

В нечеткой логике не работает закон противоречия Аристотелевой логики – исключающий одновременную истинность утверждения и его отрицания. Противоречие будет иметь место при одновременно высоких значениях степеней уверенности для различных по смыслу термов ЛП (например, высокий и низкий с одинаково большой степенью уверенности) [13].

В работе [11] под противоречивостью продукционных БЗ понимается получение разных результатов при одинаковых входных данных. В работе [8] БНЗ называется непротиворечивой, если в ней отсутствуют несовместные правила, т. е. правила, имеющие одинаковые условия, но разные заключения. Также в данном случае применимо понятие схожести для правил. Т.е. правила со схожими левыми частями и разными правыми считаются противоречивыми. Для нахождения таких противоречивых правил необходимо рассматривать функции принадлежностей термов, а также проводить нечеткий логический вывод.

Введем понятие лингвистической непротиворечивости, т.е. такой, которую можно определить, основываясь только на информации о структуре правил и не прибегая к проведению нечеткого логического вывода.

Определение 8. БНЗ называется лингвистически непротиворечивой, если выполняются следующие условия:

1. В БНЗ не существует правил с одинаковыми условиями, в которых в правой части стоят разные термы одной и той же ЛП

$$\neg\exists P_i, P_j : (P_i^A = P_j^A) \wedge \left(P_i^C \neq P_j^C\right) \wedge \left(p = q\right), \text{ где } P_i^C = t_p^a,\ P_j^C = t_q^b .$$

2. В БНЗ не существует правил, в которых в левой части присутствует два и более терма одной ЛП

$$\neg\exists P_g : \left(t_{j_p}^{k_p} \in P_g^A\right) \wedge \left(t_{j_q}^{k_q} \in P_g^A\right) \wedge \left(j_p = j_q\right).$$

Особенности структуры метаграфа, соответствующего лингвистически непротиворечивой БНЗ сформулированы ниже в виде утверждения.

Утверждение 2.

БНЗ является лингвистически непротиворечивой, т.т.т.к. метаграф $S^/$, которым она представлена, имеет следующие свойства:

1. Каждая метавершина может быть соединена не более чем с одной вершиной из одного класса эквивалентности вершин

$$\forall m_g : \left(e_a = \left(m_g, \{v_p\}\right)\right) \wedge \left(e_b = \left(m_g, \{v_q\}\right)\right) \wedge \left(v_p \in V_i\right) \wedge \left(v_q \in V_j\right) \Rightarrow \left(i \neq j\right).$$

2. Метавершина не может включать две и более эквивалентные вершины

$$\neg\exists m_g : \left(v_p \in m_g\right) \wedge \left(v_q \in m_g\right) \wedge \left(v_p \in V_i\right) \wedge \left(v_q \in V_j\right) \wedge \left(i = j\right).$$

На рис. 4 продемонстрировано графическое представление метаграфа, соответствующего БНЗ Мамдани, которая является лингвистически противоречивой.

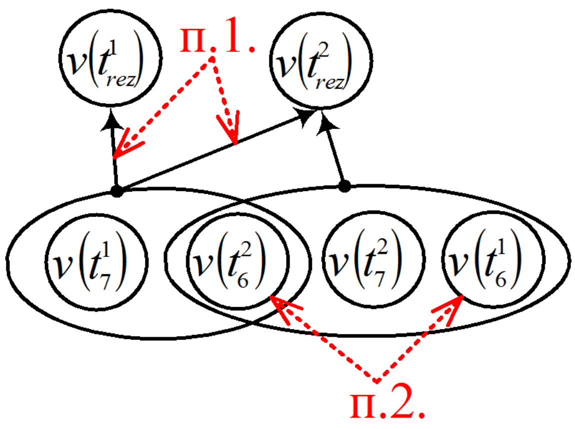

Рисунок 4. Пример метаграфа $S^/$ *, соответствующего БНЗ Мамдани, которая является лингвистически противоречивой*

Зацикливание в базе нечетких знаний

В работах [6, 7] отмечается, что в продукционной базе знаний (БЗ) присутствует зацикливание, когда существуют посылки, которые зависят от себя через последовательность правил. В работах [25, 27] выделяются два типа циклов прямой и непрямой. Прямой цикл подразумевает наличие правил, в которых заключение присутствует в условии того же правила. Непрямой цикл присутствует в случае, если факты зависят от себя же через несколько правил.

Определение 9. В базе нечетких знаний (БНЗ) отсутствует зацикливание, если выполняются следующие условия:

1. Отсутствует прямой цикл, т.е. в БНЗ не существует правил, в которых в левой и в правой части присутствуют термы одной лингвистической переменной (ЛП)

$$\neg\exists\, P_g : \left(t_{j_p}^{k_p} \in P_g^A\right) \wedge \left(t_l^z = P_g^C\right) \wedge \left(j_p = l\right).$$

2. Отсутствует непрямой цикл, т.е. в БНЗ не существует правил, при которых ЛП определяют ЛП, от которых они зависят.

Утверждение 3.

В БНЗ отсутствует зацикливание, т.т.т.к. метаграф $S^/$, которым она представлена, имеет следующие свойства:

1. Метавершина, из которой исходит дуга, не может содержать вершин эквивалентных вершине, в которую данная дуга заходит

$$\neg\exists m_g : \left(e_h = \left(m_g, \{v_p\}\right)\right) \wedge \left(v_p \in V_i\right) \wedge \left(v_q \in m_g\right) \wedge \left(v_q \in V_j\right) \wedge \left(i = j\right).$$

2. Метаграф $S^/$ не имеет циклов.

На рис.5 продемонстрировано графическое представление метаграфа, соответствующего БНЗ Мамдани, в которой присутствует зацикливание.

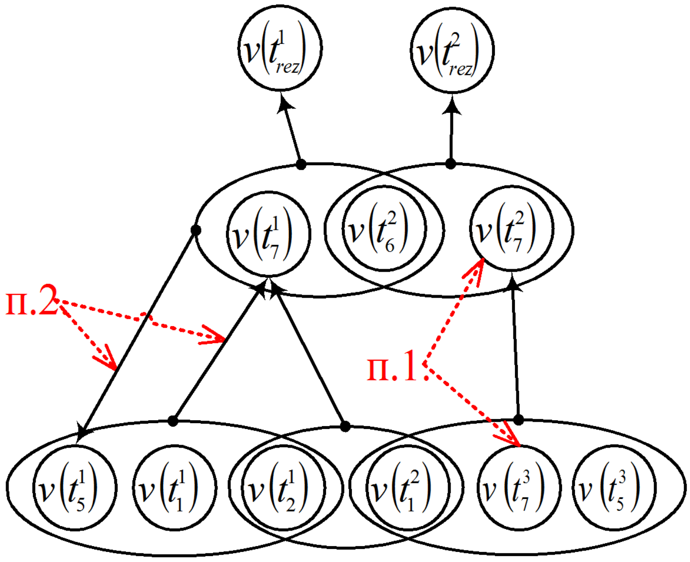

Рисунок 5. Пример метаграфа $S^{/}$*, соответствующего БНЗ Мамдани, в которой присутствует зацикливание*

Полнота БНЗ

Под неполной понимают такую БНЗ, используя которую невозможно осуществить вывод для ряда определенных исходных ситуаций [6, 7, 11].

В работе [8] показано, что, исходя из набора правил, можно определить только лингвистическую полноту. Для определения остальных видов полноты, таких как полнота нечеткой модели, полнота нечеткого разбиения и численная полнота БНЗ, необходимо рассматривать функции принадлежностей термов ЛП, а также проводить нечеткий логический вывод. Отметим, что в работе [8] рассматриваются только такие виды БНЗ, которые в данной работе определены как частичные. Ниже приведено определение лингвистической полноты частичной БНЗ, которое расширено предположением о том, что каждому терму ЛП верхнего уровня соответствует хотя бы одно правило. Также стоит отметить, что все ЛП нижнего уровня разные.

Определение 10. Частичная БНЗ является лингвистически полной, если ее правила заданы на всем декартовом произведении терм-множеств ЛП нижнего уровня и для каждого терма ЛП верхнего уровня существует хотя бы одно правило.

Из данного определения следует, что если представить БНЗ, как отображение, которое переводит элементы из декартового произведения терм-множеств ЛП нижнего уровня в термы ЛП верхнего уровня, то такое отображение будет сюръективным. Отметим, что такое отображение не будет инъективным и не будет функциональным.

Ниже приведено определение лингвистической полноты для таких БНЗ Мамдани, которые состоят из частичных БНЗ для определения результирующей ЛП.

Определение 11. БНЗ называется лингвистически полной, если все ее частичные БНЗ являются лингвистически полными, и все они задействованы для определения значения результирующей ЛП.

Используя данные о структуре метаграфа, который представляет БНЗ, можно проверить является ли БНЗ лингвистически полной. Особенности структуры метаграфа, соответствующего лингвистически полной БНЗ сформулированы ниже в виде утверждения.

Утверждение 4.

БНЗ является лингвистически полной, т.т.т.к. метаграф, который ей соответствует, имеет следующие свойства:

1. Если в метавершину, соединенную дугой с вершиной из класса эквивалентности V_i, входит вершина из класса эквивалентности V_j, то и во все остальные метавершины, соединенные дугами с вершинами из класса эквивалентности V_i, должна входить вершина из класса эквивалентности V_j

$$\begin{aligned}&\forall m_a, m_b, a \neq b : \left(e_h = \left(m_a, \{v_p\}\right)\right) \wedge \left(v_p \in V_i\right) \wedge \left(e_r = \left(m_b, \{v_q\}\right)\right) \wedge \left(v_q \in V_i\right) \wedge \\ &\wedge \left(v_s \in m_a\right) \wedge \left(v_s \in V_j\right) \Rightarrow \exists v_d : \left(v_d \in m_b\right) \wedge \left(v_d \in V_j\right)\end{aligned}.$$

2. Если существует метавершина, которая содержит вершины, каждая из которых принадлежит классам эквивалентности $\{V_{j1}, V_{j2}, ..., V_{jn}\}$ соответственно, и данная метавершина соединена дугой с вершиной из класса эквивалентности V_i, то в метаграфе должны существовать метавершины, которые включают в себя все возможные наборы вершин из классов эквивалентности $\{V_{j1}, V_{j2}, ..., V_{jn}\}$, и данные метавершины должны быть соединены дугами с вершинами из класса эквивалентности V_i.

3. Метавершина не может включать две и более эквивалентные вершины

$$\neg \exists m_g : \left(v_p \in m_g\right) \wedge \left(v_q \in m_g\right) \wedge \left(v_p \in V_i\right) \wedge \left(v_q \in V_j\right) \wedge \left(i = j\right) \wedge \left(p \neq q\right).$$

4. Если вершина не принадлежит к классу эквивалентности результирующей вершины, то она должна принадлежать метавершине

$$\forall v_p : \left(v_p \notin V_{rez}\right) \Rightarrow \exists m_g : \left(v_p \in m_g\right).$$

5. Если вершина не является входной, то она имеет хотя бы одну заходящую дугу, т.е. ее полустепень захода больше нуля

$$\forall i, p : \left(v_p \notin V_i^{input}\right) \Rightarrow \deg^{+}\left(mv_p\right) > 0, \text{ где } mv_p = \{v_p\}.$$

На рис.6 продемонстрировано графическое представление метаграфа, соответствующего БНЗ Мамдани, которая не является лингвистически полной.

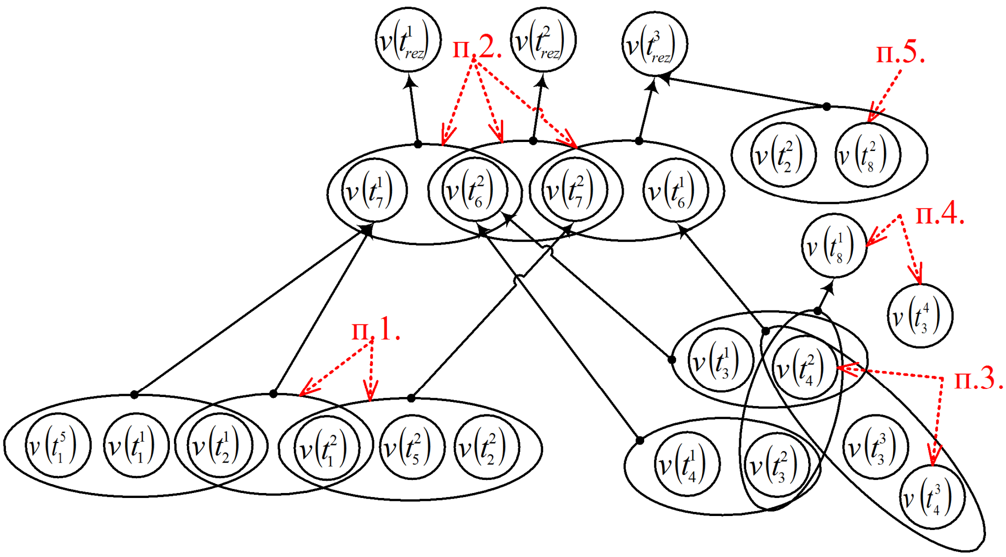

Рисунок 6. Пример метаграфа $S^{/}$, соответствующего БНЗ Мамдани, которая не является лингвистически полной

Выводы

Сформулированные в данной работе утверждения позволят в дальнейшем применить их для статической верификации БНЗ, представленной в виде метаграфа. Данное представление позволяет повысить эффективность проверки описанных свойств и выявления аномалий. В дальнейшем планируется совместить автоматическую проверку приведенных в работе утверждений, а также автоматическую визуализацию метаграфа для предоставления экспертам возможности идентифицировать, отслеживать, анализировать и исправлять выявленные аномалии в графическом виде. Это позволит увеличить наглядность и эффективность работы эксперта в процессе построения и анализа БНЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / Винница: УНИВЕРСУМ, 1999. – 320 с.
2. Глоба Л.С., Терновой М.Ю., Штогріна О. С. Технологія обробки інформації в гетерогенному інформаційно-телекомунікаційному середовищі // Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники», ч. 1, 2008. – С. 204 – 207.
3. Терновой М.Ю., Штогріна О.С. Представлення баз нечітких знань за допомогою метаграфа та проведення нечіткого логічного виведення на його основі // Вісник Харк. нац. ун-ту., Сер. «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління», 2014, № 1105. –С. 156 – 165.

4. Amit Basu, Robert W. Blanning. Metagraphs and their applications. Springer. 2007. 172 p.
5. Zheng-Hua Tan. Fuzzy Metagraph and Its Combination with the Indexing Approach in Rule-Based Systems // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2006. Vol. 18, No. 6. pp.829-841.
6. Preece A.D., Shinghal R. Foundation and Application of Knowledge Base Verification // International Journal of Intelligent Systems. 1994. Vol. 9. pp. 683-701.
7. Nguyen T. A., Perkins W. A., Laffey T. J., Pecora D. Knowledge base verification // AI Magazine. 1987. Vol. 8, No. 2. pp. 69–75.
8. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. 2-е изд. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.: ил.
9. Сергиенко М.А. Методы анализа и структуризации базы нечетких правил. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики. Воронеж, 2010.
10. Сергиенко М.А. Методы проектирования нечеткой базы знаний. Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии, 2008, № 2. – С. 67-71.
11. Поспелова Л.Я., Чуканова О.В. Поиск противоречий в продукционных базах знаний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://library.mephi.ru/data/scientific-sessions/2009/t5/0-5-1.doc – Электрон. текстовые данные. (дата обращения 7.04.2014)
12. Поспелова Л.Я. Метод поиска противоречий в нечеткой базе знаний. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ekhneu.org.ua/content/metod-poiska-protivorechiy-v-nechetkoy-baze-znaniy – Электрон. текстовые данные. (дата обращения 19.01.2015)
13. Поспелова Л.Я. Оценка степени непротиворечивости системы нечетких правил. БізнесІнформ №12, 2013. – С. 124-129.
14. Кривуля Г.Ф. Власов И.В., Павлов О.А. Оптимизация продукционных правил в диагностической экспертной системе. Тезисы тринадцатой международной научно-технической конференции «Проблемы информатики и моделирования», НТУ "ХПИ", Харьков-Ялта, 2013. – С. 5-7.
15. Carmona P., Castro J.L., Zurita J.M. Contradiction Sensitive Fuzzy Model-Based Adaptive Control – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.101.9361&rep=rep1&type=pdf – Электрон. текстовые данные. (дата обращения 19.01.2015)
16. Поморова О.В., Гнатчук Є.Г. Виявлення суперечливості правил в нечітких базах знань інтелектуальних систем технічного діагностування. – Радіоелектронні і комп’ютерні системи, 2009, № 7 (41). – С. 171–176.
17. Поморова О.В., Крищук А.Ф. Метод виявлення суперечностей у базах знань систем технічного діагностування. Вісник Хмельницького національного університету. –Хмельницький: ХНУ, 2010, №.3. – С. 257 – 260.
18. Пивкин В. Я., Бакулин Е. П., Кореньков Д. И. Нечеткие множества в системах управления – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ref.rushkolnik.ru/v46863/?page=7 – Электрон. текстовые данные. (дата обращения 19.01.2015)

19. El-Korany A., Shaalan K., Baraka H., Rafea A. An Approach for Automating the verification of KADS-based Expert Systems // New review of applied expert systems. 1998. Vol. 4. pp. 107–124.
20. Arman N. Fault Detection in Dynamic Rule Bases Using Spanning Trees and Disjoint Sets // The International Arab Journal of Information Technology. 2007. Vol.4, No.1 pp.67–72.
21. G. Valiente Feruglio Knowledge Base Verification using Algebraic Graph Transformations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.55.2760&rep=rep1&type=pdf – Электрон. текстовые данные. (дата обращения 27.02.2015)
22. Mues C., Vanthienen J. Efficient Rule Base Verification using Binary Decision Diagrams // Database and Expert Systems Applications Lecture Notes in Computer Science. 2004. V. 3180. pp. 445–454.
23. Strehl K., Moraga C., Karl-Heinz Temme, Stancovi R. Fuzzy Decision Diagrams for the Representation, Analysis, and Optimization of Rule Bases // Research Report No. 725 Department of Computer Science, University of Dortmund. 1999.
24. Vanthienen J., Mues C., Goedertier S. Experiences with Modeling and Verification of Regulations // In Proceedings of the CAiSE'06 Workshop on Regulations Modeling and their Validation & Verification (REMO2V'06).2006. pp. 793-799.
25. Saud M.A. Maghrabi Matrix Verification of Knowledge-Based System // JKAU: Sci. 2001. Vol. 13. pp. 63-82.
26. Обідін Д.М. Метод верифікації баз знань системи автоматичного управління за допомогою матричних операцій // Системи обробки інформації, 2012, випуск 3 (101), т. 2. – С. 85–89.
27. Simiński R., Wakulicz-Deja A. Circularity in Rule Knowledge Bases Detection using Decision Unit Approach // Monitoring, Security, and Rescue Techniques in Multiagent Systems Advances in Soft Computing. 2005. Vol. 28. pp 273-279.

Надійшла - 01.06.2010.