

УДК 004.822:004.89

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.155410

Разработка методов унификации структурно-логической модели метазнаний для управления эволюцией онтологий интеллектуальных систем

И. А. Котов, А. И. Суворов, А. Ю. Сердюк

Актуальність роботи обумовлена важливістю і необхідністю уніфікації побудови і використання інтелектуальних систем підтримки рішень для управління складними промисловими об'єктами та системами.

Метою роботи є обґрунтування єдиного підходу до управління базами знань різних конфігурацій і розробка уніфікованих математичних моделей операцій над елементами онтологій.

Запропоновано метод управління еволюцією онтологій професійних областей, заснований на уніфікації структурно-логічної моделі репрезентації метазнань.

Розроблено спосіб уніфікації структурно-логічної моделі еволюції інкорпорації онтологій. Розроблено формально-лінгвістичні моделі, доведено подібність форм репрезентації знань і еволюційне спадкування в рамках загальної інкорпорації онтологій. Для синтезу моделі інкорпорації еволюційного успадкування онтологій вирішені завдання розробки моделей еволюційного успадкування концептів, графів і онтологій рівнів БЗ. Модель забезпечує можливість для всіх рівнів БЗ єдиного підходу до інтерпретації структур взаємодії концептів.

Розроблено узагальнену модель сигнального графа рівнів структури БЗ. Модель включає в себе атомарний концепт, сигнал, потенціал вузла, активність вузла, поріг чутливості вузла до вхідного сигналу. Розроблено набір формальних моделей множини базових операцій на сигнальному графі БЗ, необхідних для інтерпретації та обчислення форм знань. Розроблено синтаксис метаправил і формально-лінгвістичний базис. Введено формалізми параметра маркування та функції маркування сигнального графа БЗ. Моделі маркування введені в загальну модель сигнального графа БЗ.

Досліджено можливості застосування розроблених моделей сигнального графа бази знань в різних професійних галузях. Показано, що запропоновані моделі метазнань не залежать від форм подання і формалізмів професійних онтологій. Це дозволяє використовувати єдиний механізм управління знаннями в будь-яких інтелектуальних системах підтримки рішень. Запропоновано спосіб ефективного динамічного управління структурою всіх рівнів БЗ і процесом логічного висновку в залежності від вхідних параметрів функціонування інтелектуальної системи

Ключові слова: інкорпорація онтологій, контекст моделі, маркування графа, метапродукція, репрезентація знань, сигнальний граф, система підтримки рішень

1. Введение

На современном этапе развития автоматизированных систем управления крупными производственными комплексами особую важность приобретают аспекты управления в кризисных ситуациях при дефиците времени. Данные ситуации принято называть кризисными вследствие значительного объема ущерба, возникающего в крайне ограниченный промежуток времени. В связи с этим период времени принятия управленческих решений должен иметь, как минимум, тот же порядок. Однако лицо, принимающее решение (ЛПР), не в состоянии реагировать адекватно ситуации в требуемом темпе. Главными причинами такого положения являются две □ чрезвычайно большой объем данных, требующих безошибочной оценки за минимальное время, и психологическое давление на ЛПР вследствие повышенной ответственности.

В качестве примера сложного производственного комплекса рассмотрим электроэнергетическую систему (ЭЭС), которая представляет собой большую техническую систему кибернетического типа. Параметры работы компонентов ЭЭС являются функциями времени и зависят от управляющих и случайных воздействующих факторов. Поэтому управление ЭЭС имеет итерационный, адаптивный характер, сопровождающийся сбором и обработкой больших массивов информации.

Структуру управления энергосистемой необходимо рассматривать на двух уровнях – уровне автоматического управления, где основную роль играет противоаварийная автоматика (ПА), и уровне автоматизированного управления, где оперативно-диспетчерский персонал (ОДП) включается в цикл управления в качестве лица, принимающего решения (ЛПР) [1]. В работе [2] персонал рассматривается как структурное звено многокритериальной управляющей системы.

На этапе предварительных исследований был изучен обширный фактический материал, квалифицирующий аварии на крупных технологических объектах, в том числе, в электроэнергетических комплексах. В [3] проведена классификация аварийных ситуаций. В [4] исследована роль «человеческого фактора» в развитии аварий. В том числе, согласно приведенным данным Национальной энергетической компании «Укрэнерго» [5], количество отказов на объектах электроэнергетики Украины по признаку «ошибочные действия оперативного персонала» увеличилось на 25 % и составляет 6,7 % от общего количества, по признаку «ошибочные действия руководящего, ремонтного персонала, персонала служб и лабораторий» увеличилось на 6,6 % и составляет 17,8 % от общего количества, по признаку «влияния посторонних лиц и организаций» увеличилось на 52,5 % и составляет 6,8 % от общего количества. В целом нарушения технологических процессов от влияния неверных действий персонала («человеческий фактор») в распределении по классификационным признакам составляют 31,3 %.

Приведем также некоторые примеры зарубежных инцидентов. Полностью обесточено океанское побережье Рио де Жанейро, где проживало 10 миллионов человек. Причина: неисправность не была вовремя и точно идентифицирована персоналом. Более 10 миллионов жителей Мексики и США остались без

электричества. Причина: ошибка работника компании при организации работ на электрической подстанции. Обесточены центр Буэнос-Айреса (Аргентина), президентский дворец, конгресс, правительство, пострадали 3 миллиона человек. Причина: персоналом затрачено значительное время на выяснение деталей аварии и согласование действий. Франция, АЭС «Святой Лаврентий» – взорвался запущенный реактор мощностью 500 мВт, вытекло около 50 кг жидкого ядерного топлива. Причина: во время ночной смены оператор неправильно загрузил топливный канал.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что общее количество отказов и аварийных ситуаций не уменьшается, а величины ущербов неизменно растут. Следовательно, крайне актуальной является задача обеспечения надежности функционирования ОДП, как составной части АСДУ энергосистем.

На основе сравнительного анализа существующих научно-технических решений в области автоматизации систем противоаварийного управления (ПАУ) можно сделать вывод необходимости разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений (СППР) и их внедрения в качестве составной части АСДУ энергосистем.

Таким образом, существует проблема автоматизации процесса принятия управляющих решений в кризисных ситуациях, которая должна решаться путем разработки и внедрения интеллектуальных систем поддержки принятия управляющих решений. Ядром таких систем являются комплексы управления экспертными знаниями с помощью метазнаний (МЗ) [6]. Как показано в [7], метазнания ответственны за мета-анализ и логический вывод в базе знаний.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В [8] используется система знаний для узкой профессиональной области, что не дает возможности обобщить предложенный подход. В [9] используются мета-данные верхнего уровня для построения экспертных систем, но не предложена единая методика конструирования структур метаправил для различных профессиональных областей. Работа [10] рассматривает проблему представления знаний, но предлагает таблично-ориентированную систему хранения, имеющую известные ограничения. Кроме того, не уделено внимания управлению системами знаний. В работе [11] приводится общая методология построения экспертных систем, но отсутствует конкретизация подходов к реализации модели метазнаний. В [12] рассматриваются методы представления информации о процессах в условиях неопределённости, однако эта информация не актуализируется в виде мета-правил.

Таким образом, существует методологическая проблема построения метаправил, инвариантных по отношению к специфике предметных областей, структурам БЗ, формам представления знаний, используемым формальным моделям, накладываемым ограничениям.

В качестве унифицированной формы представления мета-правил в интеллектуальной системе может использоваться формализм онтологий. В наиболее общем виде онтологию можно представить следующей формальной спецификацией:

$$O = \langle X, R, F \rangle, \quad (1)$$

где X – конечное множество концептов (понятий, терминов) предметной области, которую представляет онтология O ; R – конечное множество отношений между концептами (понятиями, терминами) заданной предметной области; F – конечное множество функций интерпретации (аксиоматизация), заданных на концептах и/или отношениях онтологии O .

В [13] дана общая характеристика онтологии, но недостаточно показаны пути реализации такой модели знаний в рамках конкретных интеллектуальных систем. Работа [14] характеризует в целом процесс управления знаниями в информационных системах, но не дает инструментов для его программной реализации. В работе [15] рассмотрена конструкция онтологии, однако она применяется к реляционной базе данных, что является значительным ограничением. Работа [16] предлагает модель онтологических паттернов, однако, последние трудно применимы в практических программных реализациях. В работе [17] обозначены принципы унификации, но в качестве базовой дана только структура БЗ на фактах. Работа [18] отличается детальным анализом онтологии, но является, в основном, теоретической работой без практической реализации. В [19] формулируется комплексная проблема методологии представления знаний, но не указаны конкретные пути ее практической реализации. Работа [20] представляет математические средства теории интеллекта, однако их практическое применение крайне затруднительно. Методы и задачи теории интеллекта рассмотрены в [21], однако работу трудно использовать как руководство в практической программной инженерии. Работа [22] предлагает предикатный подход к формализации знаний, что накладывает определенные ограничения на внутреннее программное представление БЗ. Системный подход к унификации и интерпретации МЗ сделан в спецификации стандарта Common Warehouse Metamodel (CWM) [23]. Однако на практике используется множество моделей управления знаниями в интеллектуальных системах [24], что является проблемой при выборе и адекватной реализации в рамках конкретной задачи: KIF (Knowledge Interchange Format), лямбда – нотации, предикаты, правила, алгебра отношений, логико-вычислительные семантические сети (ЛВС-сети), объектно-ориентированные формы представления, фреймы, дедуктивные системы. Работа [25] показывает специфику проблем математического моделирования систем знаний в различных областях: электроэнергетика, медицина, управление технологическими процессами, химический синтез, геологоразведка и другие. При этом, конкретные пути унификации знаний не указываются.

Обобщая проведенный анализ, сформулирована проблема, которая состоит в отсутствии унифицированной модели теоретического представления и практического построения моделей метазнаний в интеллектуальных системах. Это не позволяет осуществлять серийное производство дешевых программных систем поддержки решений.

3. Цели и задачи исследования

Целью исследования является разработка универсальной формально-логической системы метазнаний для управления эволюционной иерархией онтологий.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать математические модели процедур синтеза структур знаний всех уровней;
- разработать базовую модель элементарного сигнального графа базы знаний;
- обосновать и разработать модель маркировки сигнального графа базы знаний;
- разработать структурную и функциональную модели метаправил на основе модели элементарного сигнального графа.

4. Разработка моделей метаправил на основе структуры сигнального графа и его маркировки

4.1. Разработка математических моделей процедур синтеза структур знаний всех уровней

Из заявленных принципов следует, что структурные модели всех уровней представления знаний могут рассматриваться как сигнальные (импульсные) линейные оргграфы [26]. Последние моделируют логический вывод как проводящую систему логических цепей [27]. С этих позиций разработаны математические модели интерпретации и исчисления иерархии онтологий. В работе предлагается следующая базовая модель сигнального графа БЗ, приведенная на рис. 1.

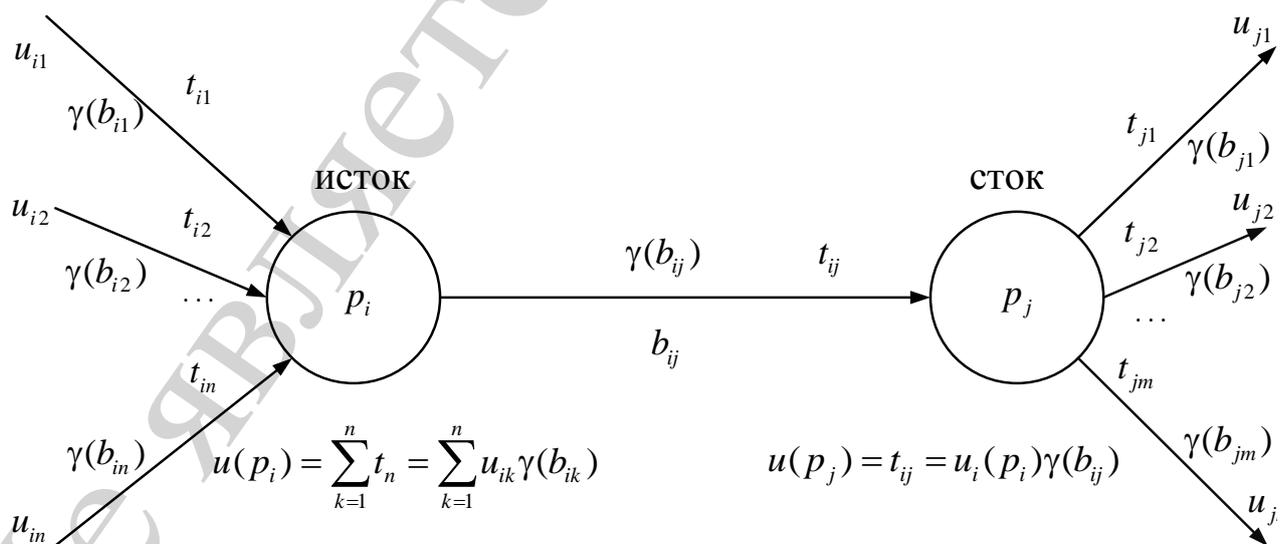


Рис. 1. Базовая модель передачи сигнала в элементарном сигнальном графе

Формулы, приведенные ниже, характеризуют маркировки соответственно узлов p_i , p_j и ветви b_{ij}

$$\mu_i^p := \langle c_s(p_i), u(p_i), s_u(p_i), a(p_i) \rangle,$$

$$\mu_j^p := \langle c_s(p_j), u(p_j), s_u(p_j), a(p_j) \rangle,$$

$$\mu_i^b := b_i \rightarrow \gamma(b_i).$$

В предлагаемой интерпретации под узлом структуры представления знаний любого уровня с точки зрения применения к нему метаправил понимаются:

- для уровня 0 – атомарное высказывание;
- для уровня 1 – факт (как связка атомарных высказываний);
- для уровня 2 – кластер семантической сети (как связка фактов);
- для уровня 3 – продукционная сеть (как связка кластеров семантических сетей).

4. 2. Разработка базовой модели элементарного сигнального графа базы знаний

Атомарный концепт – c_s – это высказывание, назначаемое узлу сигнального графа и рассматриваемое исключительно целиком при интерпретации и исчислении БЗ.

Сигнал – t – это числовой концепт, характеризующий возможность причинно-следственной связи между узлами сигнального графа. В данном случае сигнал может рассматриваться как импликация, снабженная числовой характеристикой следования или распространения сигнала. Иными словами, если в ветви графа существует сигнал, то между узлами, инцидентными этой ветви, активна причинно-следственная связь.

Потенциал узла (узловой сигнал) – $u \in \mathbb{R}$ – это число (в общем случае действительное), назначаемое узлу и ассоциированное с ним в текущей итерации работы системы. При следующей итерации возможно назначение или вычисление другого числа. Вес узла не несет конкретной семантической нагрузки и интерпретируется в рамках текущей задачи. Ассоциированные с узлами числа можно интерпретировать как веса, потенциалы, фишки узлов. Никаких принципиальных ограничений на потенциалы узлов не накладывается. Уровень активности узла (текущий потенциал узла) – это накопленный потенциал (вес, сигнал) в узле на момент участия узла в процессе интерпретации сети. Величина потенциала узла определяется как сумма всех входных сигналов через инцидентные узлу ветви. Назначение сигналов узлам реализуется функцией маркировки или вычисляется.

Активность узла – $a = (0|1)$ – это двоичный признак, характеризующий участие узла в интерпретации сети. Если узел не активный ($a=0$), он никак не

интерпретируется блоком (машиной) логического вывода (БЛВ), не участвует в логическом выводе и содержание такого узла не рассматривается.

Порог чувствительности узла к входному сигналу в общем виде – $s_u = f(t_m)$ – это мера способности узла пропускать входной сигнал в последующие инцидентные с ним ветви, где t_m – это пороговый уровень сигнала. Вид функции $f(t_m)$ определяется спецификой задачи и целями моделирования. В простейшем случае может использоваться пороговая функция или сигмоид. При превышении порога чувствительности s_u активизируется узел p_i , и в нем констатируется сигнал заданной величины $t(p_i)$. Сигналы, меньшие s_u , не воспринимаются узлом:

$$a(p_i) = \begin{cases} 0 & | t(p_i) \leq s_u(p_i), \\ 1 & | t(p_i) > s_u(p_i), \end{cases} \quad (2)$$

$$u(p_i) = \begin{cases} 0 & | t(p_i) \leq s_u(p_i), \\ u(p_i) & | t(p_i) > s_u(p_i). \end{cases} \quad (3)$$

4. 3. Разработка модели маркировки сигнального графа базы знаний

Введем функцию маркировки i -го узла сигнального графа базы знаний. Определим параметр маркировки через кортеж

$$m_\mu = \langle c_s, u, s_u, a \rangle. \quad (4)$$

Тогда маркировка для произвольного i -ого узла определится следующим образом

$$\mu_i^p : p_i \rightarrow m_\mu(p_i) = \langle c_s(p_i), u(p_i), s_u(p_i), a(p_i) \rangle, \quad (5)$$

$$\mu_i^p \in M^p,$$

$$p_i \in P(G_s),$$

$$M^p : P(G_s) \rightarrow m_\mu(P),$$

$$u(p_i), s_u(p_i) \in \mathbb{R},$$

где μ_i^p – функция маркировки i -го узла p_i параметром $c(p_i)$; M^p – общая маркировка узлов кластера (или всей сети), по отношению к которому используется модель метазнаний; $P(G_s)$ – множество узлов кластера (или всей сети), по отношению к которому используется модель метазнаний; \mathbb{R} – множество действительных чисел.

Под ветвью b_{jk} между узлами j и k структуры представления знаний любого уровня с точки зрения применения к нему метаправил будем понимать направленное отношение (связь, дугу) между этими узлами в сигнальном графе базы знаний. Каждая ветвь имеет входной и выходной потенциалы (сигналы). При этом, если ветвь направлена от узла j к узлу k , то узел j , имеющий потенциал u_j , будет истоковым, а узел k , имеющий потенциал u_k , – стоковым. Используя принятые ранее обозначения, ветвь графа БЗ представится следующим образом

$$I : b_{jk} \rightarrow (p_j, p_k),$$

$$b_{jk} \in A(G_s),$$

$$p_j, p_k \in P(G_s),$$

где b_{jk} – ветвь графа сети уровня БЗ; I – функция инцидентности; $A(G_s)$ – множество всех ветвей графа G_s сети уровня БЗ; p_j, p_k – узлы, инцидентные ветви b_{jk} .

Проводимость (передача) ветви – $\gamma(b)$ – это число (в общем случае действительное), связанное с ветвью. Назначение чисел ветвям реализуется маркировкой. Числа, ассоциированные с ветвями, можно считать весами, проводимостями, длинами, стоимостями ветвей и т.д. Никаких ограничений на эти числа не накладывается. В рамках данной работы полагаем числа, помечающие ветви, проводимостями этих ветвей.

Введем функцию маркировки i -й ветви следующим образом:

$$\mu_i^b : b_i \rightarrow \gamma(b_i), \tag{6}$$

$$\mu_i^b \in M^B,$$

$$M^B : A(G_s) \rightarrow \mathbb{R}.$$

$$b_i \in A(G_s),$$

$$\gamma(b_i) \in \mathbb{R},$$

где μ_i^b – функция маркировки i -ой ветви b_i числом t_i ; M^B – общая маркировка ветвей кластера (или всей сети), по отношению к которому используется модель метазнаний; $A(G_s)$ – множество направленных ветвей графа кластера (или всей сети), по отношению к которому используется модель метазнаний; \mathbb{R} – множество действительных чисел.

Теперь предложенная обобщенная модель графа уровня структуры БЗ может быть описана следующим кортежем

$$G_s = (P(G_s), A(G_s), M_\Sigma),$$

$$M_\Sigma = \langle M^P, M^B \rangle. \quad (7)$$

4. 4. Разработка структурной и функциональной моделей метаправил на основе модели элементарного сигнального графа

Введем подмножество базовых операций на графе БЗ – G_s , необходимых для интерпретации и исчисления уровней БЗ

$$O_{KB}(G_s) \subset O(G),$$

где $O_{KB}(G_s) = \{O_{KBi}\}$ – подмножество операций по отношению к базе знаний такое, что: $O_{KB1} :=$ добавление нового концепта в БЗ; $O_{KB2} :=$ удаление концепта из БЗ; $O_{KB3} :=$ добавление новой связи в БЗ; $O_{KB4} :=$ удаление связи из БЗ; $O_{KB5} :=$ присоединение к БЗ нового фрагмента – БЗ'; $O_{KB6} :=$ отсоединение от БЗ фрагмента – БЗ'; $O(G)$ – все множество операций, реализуемых на графах.

Тогда формально определим.

Для

$$O_{KB1} :$$

$$G_s(P(G_s), A(G_s)) + p_s, \quad p_s \notin P(G_s), \quad (8)$$

$$G_s(P(G_s), A(G_s)) + p_s = G'_s(P(G'_s), A(G'_s)),$$

$$P(G'_s) = P(G_s) \cup \{p_s\},$$

$$A(G'_s) = A(G_s),$$

$$\mu_i^p : p_{si} \rightarrow m_\mu(s_i, 0, 0, 0).$$

Для

$$O_{KB2} :$$

$$G_s(P(G_s), A(G_s)) - p_s, \quad p_s \in P(G_s), \quad (9)$$

$$G_s(P(G_s), A(G_s)) - p_s = G'_s(P(G'_s), A(G'_s)),$$

$$P(G'_s) = P(G_s) \setminus \{p_s\},$$

$$A(G'_s) = A(G_s) \setminus \{b = \{p_{s1}, p_{s2}\} \mid b \in A(G_s), p_{s1} = p_s \vee p_{s2} = p_s\},$$

$$\mu_i^p : p_{si} \rightarrow m_\mu(0,0,0,0).$$

Для

$$O_{KB3}:$$

$$G_s(P(G_s), A(G_s)) + b, \quad b \notin A(G_s),$$

(10)

$$G_s(P(G_s), A(G_s)) + b = G'_s(P(G'_s), A(G'_s)),$$

$$A(G'_s) = A(G_s) \cup \{b\},$$

$$b = \{p_{s1}, p_{s2}\} \mid b \in A(G'_s); p_{s1}, p_{s2} \in P(G_s),$$

$$P(G'_s) = P(G_s),$$

$$\mu_i^b : b_i \rightarrow \gamma(b_i).$$

Для

$$O_{KB4}:$$

$$G_s(P(G_s), A(G_s)) - b, \quad b \in A(G_s),$$

(11)

$$G_s(P(G_s), A(G_s)) - b = G'_s(P(G'_s), A(G'_s)),$$

$$P(G'_s) = P(G_s),$$

$$A(G'_s) = A(G_s) \setminus \{b\},$$

$$\mu_i^b : b_i \rightarrow 0.$$

Для

$$O_{KB5}:$$

$$G_s(P(G_s), A(G_s), M_\Sigma(G_s)) + G'_s(P(G'_s), A(G'_s), M_\Sigma(G'_s)),$$

(12)

$$P(G_s) \cap P(G'_s) = \emptyset, A(G_s) \cap A(G'_s) = \emptyset,$$

$$G_s(P(G_s), A(G_s), M_\Sigma(G_s)) \cup G'_s(P(G'_s), A(G'_s), M_\Sigma(G'_s)) = \\ = G''_s(P(G'_s), A(G'_s), M_\Sigma(G'_s)),$$

$$P(G''_s) = P(G_s) \cup P(G'_s), A(G''_s) = A(G_s) \cup A(G'_s),$$

$$M_\Sigma(G''_s) = M_\Sigma(G_s) \cup M_\Sigma(G'_s),$$

$$\forall p_i \mid p_i \in P(G'_s) (\mu_i^p : p_{s_i} \rightarrow m_\mu(s_i, 0, 0, 0)),$$

$$\forall b_i \mid b_i \in A(G'_s) (\mu_i^b : b_i \rightarrow \gamma(b_i)),$$

$$\forall b_i \mid b_i = [p_{s_1}, p_{s_2}] \wedge (p_{s_1} \in A(G_s) \wedge p_{s_2} \in A(G'_s)) \vee \\ \vee (p_{s_1} \in A(G'_s) \wedge p_{s_2} \in A(G_s)) (\mu_i^b : b_i \rightarrow \gamma(b_i)).$$

Для

O_{KB6} :

$$G_s(P(G_s), A(G_s)) - G'_s(P(G'_s), A(G'_s)), \quad (13)$$

$$P(G'_s) \subseteq P(G_s), A(G'_s) \subseteq A(G_s),$$

$$G_s(P(G_s), A(G_s)) \setminus G'_s(P(G'_s), A(G'_s)) = \\ = G''_s(P(G'_s), A(G'_s)),$$

$$P(G''_s) = P(G_s) \setminus P(G'_s),$$

$$A(G''_s) = \{[p_{s_1}, p_{s_2}] \mid p_{s_1}, p_{s_2} \in A(G_s) \setminus A(G'_s) \wedge \\ \wedge [p_{s_1}, p_{s_2}] \in A(G_s) \wedge [p_{s_1}, p_{s_2}] \notin A(G'_s)\},$$

$$\forall p_i \mid p_i \in P(G'_s) (\mu_i^p : p_{s_i} \rightarrow m_\mu(0, 0, 0, 0)),$$

$$\forall b_i \mid b_i \in A(G'_s) (\mu_i^b : b_i \rightarrow 0),$$

$$\forall b_i \mid b_i = [p_{s_1}, p_{s_2}] \wedge (p_{s_1} \in A(G_s) \wedge p_{s_2} \in A(G'_s)) \vee \\ \vee (p_{s_1} \in A(G'_s) \wedge p_{s_2} \in A(G_s)) (\mu_i^b : b_i \rightarrow 0).$$

Естественно, что при добавлении нового концепта существует вероятность его повторения (дублирования.) Для этой цели должны использоваться процедуры «нормализации» базы знаний, избавления от избыточности. В данном случае приведена формальная теоретико-множественная интерпретация, характеризующая факт добавления нового концепта. Поэтому дополнительные формальные ограничения, связанные с возникновением избыточности, были опущены.

Разработанные модели управления структурой БЗ, основанные на аппарате графов, позволяют формализовать язык уровня метаправил и описать его онтологию. При разработке формального языка метаправил было необходимо выбрать формально-теоретический аппарат, который бы подходил для представления всех форм знаний. В качестве такого аппарата была выбрана графовая модель, как наиболее фундаментальная. Кроме того, была поставлена задача интегрировать форму представления метаправил в общую иерархию представления знаний. Поэтому метазнания также представляются графовыми моделями и не требуют разработки отдельного теоретического механизма для их представления. Таким образом, все уровни знаний представляются и описываются одной и той же математической моделью графового представления. Предлагаемый в работе подход позволяет не вводить дополнительные формальные или инструментальные механизмы управления метаправилами, требующие финансовых, вычислительных и временных затрат.

При этом необходимо учесть следующие особенности:

- метаправила выполняют структуризацию БЗ, чем определяют механизм ее выполнения (исчисления);
 - метаправила имеют доступ ко всем уровням БЗ, расположенных ниже;
 - метаправила получают входные данные (сигналы) из «внешнего мира».
- Структура входных данных может отличаться от внутреннего представления БЗ;
- метаправила выступают в качестве интерфейса между интеллектуальной системой и БЛВ;
 - метаправила могут не образовывать сетевых структур, так как логика использования определяется работой интеллектуальной системы, а не логикой БЗ.
- Метаправило MR будем представлять следующим соотношением:

$$MR: \bigwedge_{i=1}^n S_{MRi} \rightarrow O_{KBj}, \quad (14)$$

где Lop – логическая операция, связка – AND (\wedge) или OR (\vee), относящаяся к условиям метаправила. Операция NOT (\neg) применяется при $n=1$ и обычно имплементируется в антецедент метаправила; S_{MRi} – текущее условие метаправила; O_{KBj} – одна из операций маркировки или структуризации БЗ (приведены в формулах (8)–(13)), $O_{KBj} \in O_{KB}$; \rightarrow – операция следования, здесь – применение операции O_{KBj} .

Необходимо указать, что логические операции (связки), реализуемые в метаправилах по отношению к кластерам БЗ, учитывают признак активности

(актуализации) этих кластеров. Под активизацией или актуализацией кластера или его элемента метаправило понимает состояние маркировки $a=1$.

Графическая иллюстрация предложенной модели метаправила приведена на рис. 2, из которого видно, что метаправило может применяться ко всем уровням системы представления знаний.

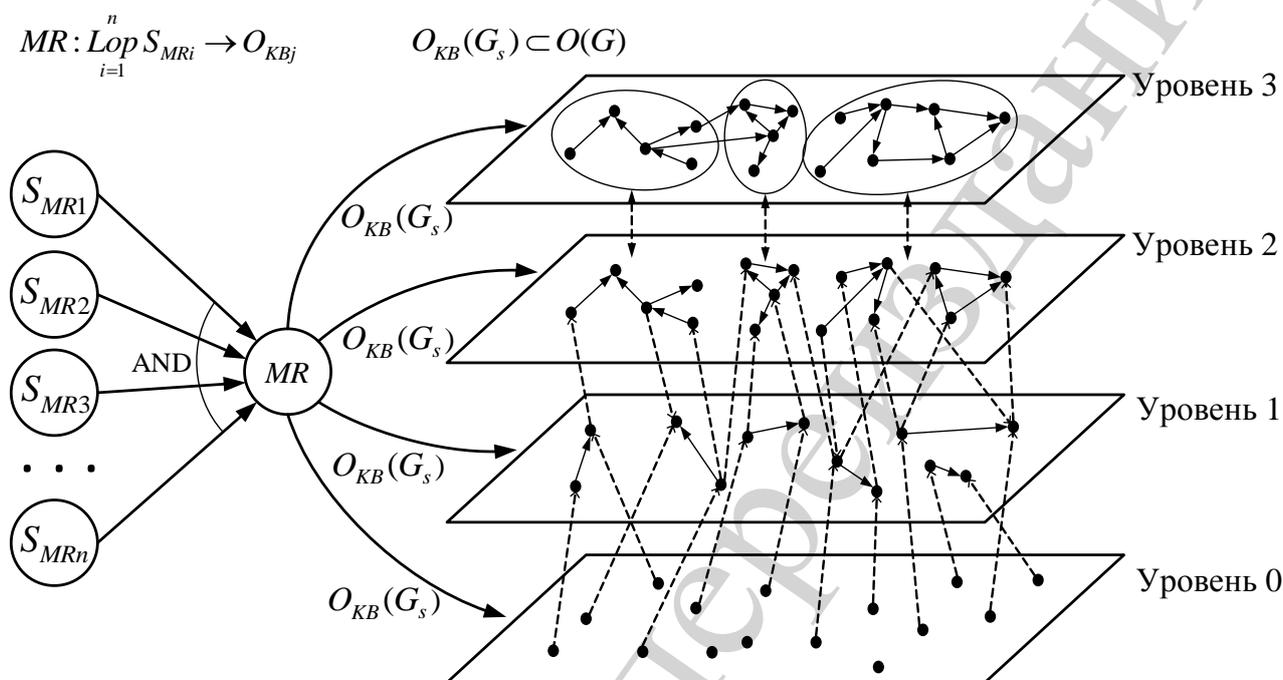


Рис. 2. Модель применения метаправила по отношению к эволюции онтологий

В общем случае, метаправила могут быть типов AND и OR. При этом их структура описывается одинаково. Они запускаются в работу в соответствии с правилами конъюнкции или дизъюнкции. При унификации, правила типа OR могут быть разбиты по количеству входов на правила типа AND. Таким образом, можно использовать только конъюнктивные формы метаправил. Как было отмечено ранее (и в соответствии с определением метазнаний), метаправило реализует управляющий механизм по отношению к уровням БЗ. Дугами показаны направления влияния и реализации управляющих функций со стороны метаправила по отношению к уровням иерархии БЗ. Входные элементы метаправила $\{S_{MRi}\}$ представляют собой сигнальные данные от программной среды СППР (БЛВ, пользователя). На рисунке справа показана иерархия (эволюция) онтологий и формальные модели.

Импликация в метаправиле происходит на основе актуализации antecedента $\bigwedge_{i=1}^n S_{MRi}$ или $\bigvee_{i=1}^n S_{MRi}$. В случае истинности комбинированного условия консеквент реализуется в виде действий по отношению к сигнальным графам уровней иерархии БЗ.

Зададим кортеж метаправила аналогично, однако с указанием особенностей его функционирования

$$MR = \langle S_{MR}, L, A \rightarrow B, Q \rangle, \quad (15)$$

где S_{MR} – класс сигнальных состояний БЗ, СППР, внешней среды, для которых применимо метаправило MR ; L – условие срабатывания метаправила; $A \rightarrow B$ – ядро (структура) метаправила; Q – неформальное обоснование продукции.

Формализуем ядро метаправила, учитывая его специфику.

Терминальный алфавит метапродукции представляет собой множество:

$$\Sigma = A_t = \{\varepsilon\} \cup S_{MR} \cup O_{KB}(G_S), \quad (16)$$

где S_{MR} – идентификаторы сигнальных состояний в соответствии с (15); $O_{KB}(G_S)$ – идентификаторы операций над БЗ.

Синтез формальной модели метаправила описывается, как процедура логической комбинации сигнальных состояний S_{MRi} комплекса (БЗ – БЛВ – СППР – внешняя среда) и операций из множества $O_{KB}(G_S)$, отвечающих следующему условию:

$$\begin{aligned} & \exists \left(\bigvee_{i=1}^n S_{MRi}, \bigwedge_{i=1}^n S_{MRi} \mid S_{MRi} \in S_{MR} \right) \exists \left(O_{KBi}(G_S) \mid O_{KBi}(G_S) \in O_{KB}(G_S) \right) \\ & \left(\left(\bigvee_{i=1}^n S_{MRi} \right) \vee \left(\bigwedge_{i=1}^n S_{MRi} \right) \rightarrow O_{KBi}(G_S) \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Принимая, что база метаправил нормализована, свойства уровня продукции MR должны быть следующими:

$$\begin{aligned} N_{MR} &= S_{MR}^{c_1} \cup S_{MR}^{c_2} \cup \dots \cup S_{MR}^{c_m} \cup O_{KB}^{c_1}(G_S) \cup O_{KB}^{c_2}(G_S) \cup \dots \cup O_{KB}^{c_n}(G_S) = \\ &= \bigcup_{i=1}^m S_{MR}^{c_i} \cup \bigcup_{i=1}^n O_{KB}^{c_i}(G_S), \end{aligned} \quad (18)$$

$$S_{MR}^{c_1} \cap S_{MR}^{c_2} \cap \dots \cap S_{MR}^{c_m} = \bigcap_{i=1}^m S_{MR}^{c_i} = \emptyset, \quad (19)$$

$$O_{KB}^{c_1}(G_S) \cap O_{KB}^{c_2}(G_S) \cap \dots \cap O_{KB}^{c_n}(G_S) = \bigcap_{i=1}^n O_{KB}^{c_i}(G_S) = \emptyset. \quad (20)$$

В работе используется термин «нормализация» из области реляционных баз данных, но в более общем смысле. Предполагается, что процесс «нормализации» по отношению к базе знаний заключается, прежде всего, в удалении избыточности и противоречивости БЗ. Кроме того, предполагаются механизмы, направленные на сокращение объема БЗ.

Целостность базы метаправил может обеспечиваться теми же принципами, что и целостность БД, – вводом системы ограничений на элементы БЗ.

Вопросы сохранения ранее определенных связей между отдельными концептами, равно как и вопросы сохранения прочих атрибутов БЗ, обеспечиваются общими средствами поддержки БЗ. Разные уровни управления знаниями – это разные уровни интерпретации одних и тех же базовых элементов – концептов и связей между ними. База знаний строится только из этих элементов. Поэтому, при переходе на более высокие уровни всегда используются элементы базового уровня концептов.

Введем синтаксис базы метаправил:

<база метаправил> ::= <метаправило>[<метаправило>];
 <метаправило> ::=
 <тип> <идентификатор_условия>[<идентификатор_условия>]
 <идентификатор_операции>;
 <тип> ::= AND | OR;
 <идентификатор_условия> ::= <код_ситуации>;
 <идентификатор_операции> ::= <код_операции>.

Здесь термины <код_ситуации> и <код_операции> получаются из идентификаторов <идентификатор_условия> и <идентификатор_операции> после компиляции БЗ.

Представим формальный язык модели метаправил иерархии онтологий следующим образом

$$L(G)_{MR} = \langle \Sigma_{MR}, N_{MR}, P_{MR}, S_{MR} \rangle, \quad (21)$$

где G – формальная грамматика набора метаправил; Σ_{MR} – основной терминальный алфавит набора метаправил; N_{MR} – вспомогательный нетерминальный алфавит набора метаправил; P_{MR} – правила подстановки (продукции) формальной грамматики сети: $\exists a, \exists b, (a, b) \in P_{MR} : a \rightarrow b$; S_{MR} – стартовый нетерминальный символ грамматики G , где

$$N_{MR} \cap \Sigma_{MR} = \emptyset \text{ и } P_{MR} \subset ((N_{MR} \cup \Sigma_{MR})^+ \times (N_{MR} \cup \Sigma_{MR})^*).$$

Теперь зададим правила формальной грамматики P_{MR} для языка $L(G)_{MR}$ набора метаправил:

$$S_{MR} \rightarrow MR^{C_i},$$

$$MR^{C_i} \rightarrow \langle \text{and} \rangle S_{MR}^{C_i} O_{KB}^{C_i},$$

$$MR^{C_i} \rightarrow \langle \text{or} \rangle S_{MR}^{C_i} O_{KB}^{C_i},$$

$$MR^{C_i} \rightarrow \langle \text{and} \rangle S_{MR}^{C_i} \mid [S_{MR}^{C_i}] O_{KB}^{C_i},$$

$$MR^{C_i} \rightarrow \langle \text{or} \rangle S_{MR}^{C_i} \mid [S_{MR}^{C_i}] O_{KB}^{C_i}.$$

Разработаем структурно-лингвистическую модель онтологии для уровня БЗ метаправил – KB_{MR}

$$O_{KB}^{MR} = \langle X^{MR}, R^{MR}, F^{MR} \rangle. \quad (22)$$

Концептами онтологии метаправил являются контекстные кластеры метаправил, состоящие из подмножеств ситуаций и операций. Тогда для всех кластеров всех контекстов будем иметь

$$\begin{aligned} X^{MR} &= N_{MR} = \{ \{ S_{MRk}^{C_i} \mid k = 1, n_s \} \mid i = 1, n_c \} \cup \\ &\cup \{ \{ O_{KBk}^{C_i} \mid k = 1, n_o \} \mid i = 1, n_c \} = \\ &= \bigcup_{i=1}^{n_c} \{ \bigcup_{k=1}^{n_s} S_{MRk}^{C_i} \cup \bigcup_{k=1}^{n_o} O_{KBk}^{C_i} \}. \end{aligned} \quad (23)$$

Однако операции $O_{KBk}^{C_i}$ реализуются по отношению к структурным элементам БЗ, представляющей собой сигнальный граф. Поэтому результат операции будет зависеть от структуры и маркировки графа непосредственно перед операцией и его необходимо рассматривать, как функцию текущего состояния графа БЗ

$$O_{KBk}^{C_i} = F_k^{C_i}(P(G_s), A(G_s), M_\Sigma). \quad (24)$$

Тогда

$$X^{MR} = \bigcup_{i=1}^{n_c} \{ \bigcup_{k=1}^{n_s} S_{MRk}^{C_i} \cup \bigcup_{k=1}^{n_o} F_k^{C_i}(P(G_s), A(G_s), M_\Sigma) \}. \quad (25)$$

Из (24) также следует, что результатом операции будет являться новая структура БЗ, а, значит, на следующей итерации должна использоваться иная структура метаправил. Таким образом, структура отношений применяемых метаправил $R(MR)$ зависит от структуры (состояния) уровней БЗ. Иными словами, для двух состояний БЗ ($БЗ'$ и $БЗ''$) справедливо записать

$$O_{KBk}^{C_i} : БЗ' \rightarrow БЗ'',$$

$$R(MR') : f(R(БЗ')),$$

$$R(MR'') : f(R(\mathcal{B}3'')),$$

$$R(MR) = F(R(\mathcal{B}3)). \quad (26)$$

Для определения множества функций интерпретации F^{MR} необходимо учесть, что операции $O_{KB}^{C_i}$ по отношению к уровням инкорпорации онтологий соответствуют эволюционной иерархии форм знаний, а, значит, являются иерархически вложенными. Поэтому сложные операции могут рассматриваться как суперпозиция более простых. Следовательно, метаправила высокого уровня могут интерпретироваться через наборы элементарных.

Пусть O_{KBj} есть суперпозиция

$$O_{KBj} = O_{KB1} \circ O_{KB2} \dots \circ O_{KBn}.$$

Тогда

$$MR : \text{Lop}_{i=1}^n S_{MRi} \rightarrow O_{KBj},$$

$$MR : \text{Lop}_{i=1}^n S_{MRi} \rightarrow (O_{KB1} \circ O_{KB2} \dots \circ O_{KBn}),$$

$$MR_n : \text{Lop}_{i=1}^n S_{MRi} \rightarrow O_{KBn}, \dots, MR_2 : \text{Lop}_{i=1}^n S_{MRi} \rightarrow O_{KB2}, MR_1 : \text{Lop}_{i=1}^n S_{MRi} \rightarrow O_{KB1},$$

и, следовательно,

$$MR_j = MR_n \circ MR_{n-1} \circ \dots \circ MR_2 \circ MR_1. \quad (27)$$

Следовательно, функция интерпретации f_j для метаправила MR_j в общем виде может быть представлена как

$$f_j^{MR} : \text{Op}(MR_n \circ MR_{n-1} \circ \dots \circ MR_2 \circ MR_1, I_j) \rightarrow (MR_j, I_j) \mid f_j^{MR} \in F^{MR}, \quad (28)$$

где Op – операция агрегации (суперпозиции) метаправил; I_j – индекс контекста применимости метаправил.

На основе разработанных структурно-множественных моделей получена формальная модель унифицированной онтологии метаправил для уровня эволюции знаний типа «Метаонтология»:

$$O^{MR} = \langle \bigcup_{i=1}^{n_c} \bigcup_{i=1}^{n_s} S_{MRk}^{c_i} \cup \bigcup_{k=1}^{n_o} F_k^{c_i}(P(G_s), A(G_s), M_\Sigma) \rangle, F(R(\text{БЗ})), F^{MR} \rangle. \quad (29)$$

4. 5. Экспериментальное подтверждение результатов исследований

Для экспериментального подтверждения результатов исследований была построена пробная БЗ и база метаправил для управления уровнями знаний. После формирования тезауруса концептов и его трансляции в коды минимальной длины были сформированы коды фактов и коды метаправил. На этой основе реализованы операции на структуре фактов путем маркировки их сигнальных графов. Анализ практических результатов показал, что маркировка является эффективным средством модификации БЗ. Например, формирование нового факта на основе тезауруса требует маркировки всего двух новых связей – записи в БЗ двух числовых кодов дуг сигнального графа. Детальный практический пример использования метаправил приведен ниже.

Приведем пример практического использования разработанных математических моделей представления метаправил и модели профессиональной онтологии O^{MR} – базы знаний (KB^{MR}) (рис. 3).

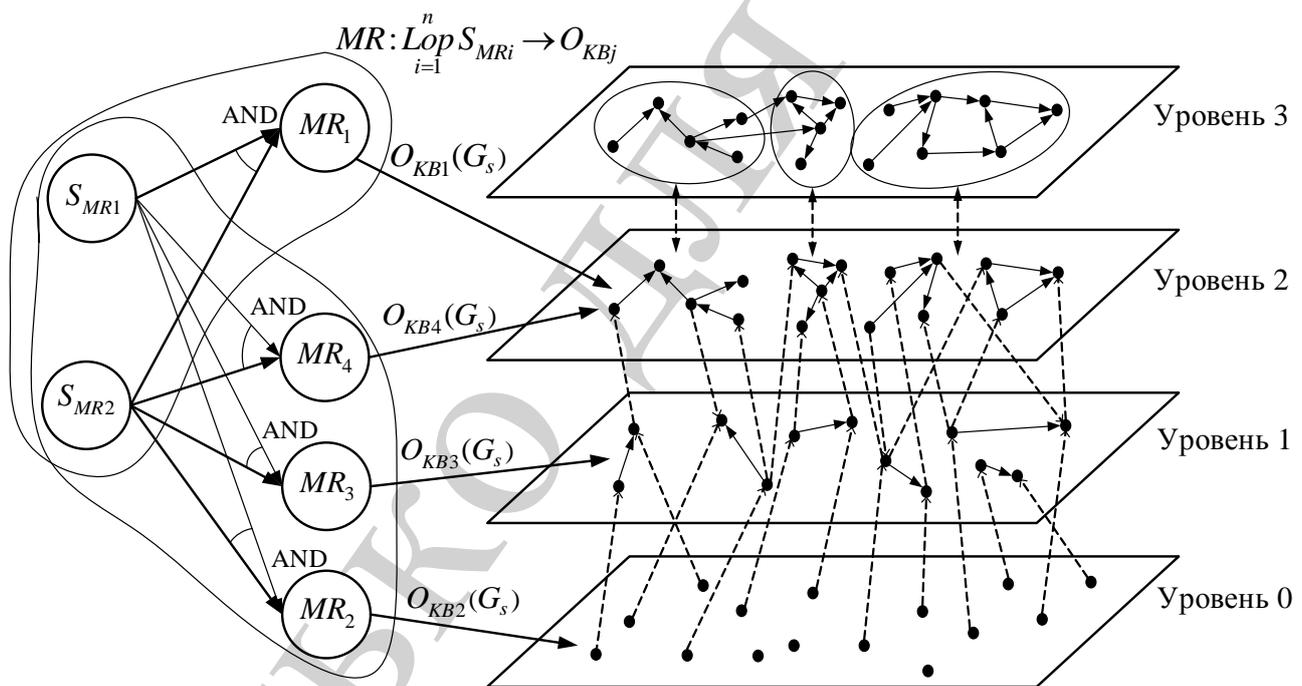


Рис. 3. Пример схемы интерпретации в онтологии метаправил

Введем множества атомарных высказываний, относящихся к одному контексту $s^0 := \langle 7.2 \text{ Ликвидация технологических нарушений при обесточении сборных шин 150–330-750кВ.} \rangle$.

$s_1^{c_0}$ – «Инструкция ДС-8», $s_2^{c_0}$ – «п. 7.2.1», $s_3^{c_0}$ – «Напряжение на СШ подается после осмотра, выявления и отделения поврежденного присоединения или элемента СШ и удаления людей из РУ.».

$S_{MR1} := \langle \text{Внести в БЗ новый факт} \rangle.$

$S_{MR2} := \langle s_1^{c_0} \rangle \langle s_2^{c_0} \rangle \langle s_3^{c_0} \rangle.$

$O_{KB1} := \langle \text{Добавить к семантической сети уровня 2 н } s_3^{c_0} \text{ овый факт } \langle s_1^{c_0} \rangle \langle s_2^{c_0} \rangle \langle s_3^{c_0} \rangle \text{ и связать его с контекстом} \rangle$

$O_{KB2} := \langle \text{Добавить атомарные семантические единицы – } \langle s_1^{c_0} \rangle, \langle s_2^{c_0} \rangle, \langle s_3^{c_0} \rangle \text{ в тезаурус (слой 0)} \rangle$

$O_{KB3} := \langle \text{Добавить узел } \langle s_1^{c_0} \rangle \text{ в структуру уровня 1; Добавить узел } \langle s_3^{c_0} \rangle \text{ в структуру уровня 1; Добавить отношение } \langle s_2^{c_0} \rangle \text{ между узлами } \langle s_1^{c_0} \rangle \text{ и } \langle s_3^{c_0} \rangle \rangle$

$O_{KB4} := \langle \text{Добавить подграф } \langle s_1^{c_0} \rangle \langle s_2^{c_0} \rangle \langle \rangle \text{ в граф уровня 2. Установить связь с сетью контекста } C^0 \rangle$

Метаправила имеют следующий вид:

$MR_1^{C_0} := \langle \text{and} \rangle S_{MR1}^{C_0} S_{MR2}^{C_0} O_{KB1}^{C_0};$

$MR_2^{C_0} := \langle \text{and} \rangle S_{MR1}^{C_0} S_{MR2}^{C_0} O_{KB2}^{C_0};$

$MR_3^{C_0} := \langle \text{and} \rangle S_{MR1}^{C_0} S_{MR2}^{C_0} O_{KB3}^{C_0};$

$MR_4^{C_0} := \langle \text{and} \rangle S_{MR1}^{C_0} S_{MR2}^{C_0} O_{KB4}^{C_0}.$

Покажем практическую реализацию одного из метаправил приведенной системы – $MR_1^{C_0} := \langle \text{and} \rangle S_{MR1}^{C_0} S_{MR2}^{C_0} O_{KB1}^{C_0}$.

AND

$\langle \text{Инструкция по ликвидации аварий} \rangle$

$\langle \text{Внести в БЗ новый факт} \rangle$

$\langle \langle \text{Инструкция ДС-8} \rangle \langle \text{п. 7.2.1} \rangle \langle \text{Напряжение на СШ подается после осмотра, выявления и отделения поврежденного присоединения или элемента СШ и удаления людей из РУ} \rangle \rangle$

$\langle \text{Добавить к семантической сети уровня 2 новый факт и связать его с контекстом} \rangle$

Или (с примерами кодов) после трансляции:

AND<027B><002C><01A3 00D8 10F5><0004>.

где 027B – код контекста; 002C – код задачи метаправила; 01A3 00D8 10F5 – коды концептов факта; 0004 – код операции добавления факта в БЗ.

В результате коды концептов факта <01A3 00D8 10F5> будут записаны в БЗ, связаны друг с другом в матрице смежности узлов и с соответствующим контекстом. Далее, факт становится пригодным для работы.

Теперь функция интерпретации для уровня метаправил будет иметь форму

$$f_1^{MR} : Op(\{(MR_2^{c_0}, c^0), (MR_3^{c_0}, c^0), (MR_4^{c_0}, c^0)\}) \rightarrow (MR_1^{c_0}, c^0).$$

Таким образом, теоретически обоснована и практически построена структурно-лингвистическая модель унифицированной профессиональной онтологии уровня метаправил.

5. Обсуждение результатов исследования управления эволюционной инкорпорацией уровней знаний с помощью метаправил

Полученные результаты структурно-логического моделирования уровней знаний как сигнальных графов и их маркировки адекватно моделируют процессы динамического синтеза структур знаний и позволяют строить модели метаправил для эффективного управления БЗ. Следует сказать, что механизм работы метаправил не зависит от уровня инкорпорации знаний и может динамически реализовываться по отношению к любому из них.

Особенности предложенного метода и полученных результатов в сравнении с существующими состоят в том, что разработанные модели БЗ и метаправил инвариантны к профессиональным областям, что делает предложенные механизмы работы метаправил универсальными. Предложенный математический аппарат, совмещающий формализм сигнального графа и функцию его маркировки, является эффективным средством представления знаний и перспективным инструментом при серийном производстве систем поддержки решений.

Проблема эффективности и скорости работы с БЗ имеет две составляющие. Первая – это подготовка БЗ и, в том числе, формирование метаправил и обработки знаний. Вторая – это время ввода исходных данных.

Подготовка (наполнение, верификация) базы знаний производится в подготовительный период вне процесса непосредственной эксплуатации. При появлении новых выводов (знаний), их внесение в БЗ занимает минимальное время при согласии (или отклонении) пользователем.

Ввод исходных данных, идентифицирующих задачу, – действительно большая проблема. Она решается сочетанием двух подходов. Во-первых, все известные параметры ситуаций вносятся в БЗ заранее на стадии подготовки. Поэтому в процессе работы производится идентификация ситуации по отношению к накопленным моделям. Во-вторых, ввод исходных данных должен в максимальном объеме считываться с датчиков объекта управления. В этом случае (в пределах) СППР переходит в режим автоматической системы. Однако часть данных вносится вручную, и оператор принимает промежуточные

решения в процессе диалога с системой. В данном случае последняя является автоматизированной и направлена на автоматизацию процесса управления и принятия решений.

Предложенные модели маркировки вершин и ветвей графа, а также распространения сигнала для моделирования процесса логического вывода обладают тем преимуществом, что позволяют динамически формировать кластеры интеллектуальных сетей. Такие сети могут рассматриваться как наборы фактов, семантические сети или сети продукций. В качестве частных случаев из сигнальных графов можно формировать справочники, реляционные базы данных или подмножества искусственных нейронных сетей.

В качестве ограничения предложенных моделей может рассматриваться сильно связный граф БЗ и длительное время его обхода. Однако это ограничение можно компенсировать кластеризацией большой БЗ по признакам контекста задачи.

К недостаткам исследования могут быть отнесены следующие обстоятельства. В части соответствия разработанных моделей сигнального графа физическим моделям требуется дальнейшее уточнение формального представления распространения сигнала между узлами с разными потенциалами атомарных концептов. Предлагается регулировать направление распространения сигнала в сети разностью потенциалов вершин сигнального графа. Однако при этом возникает проблема обратного распространения сигнала, что может противоречить модели логического следования рассуждений. Данная проблема является предметом дальнейших теоретических исследований и практических апробаций. Она может быть решена путем ввода в формально-логические модели дополнительных ограничений на направления дуг сигнального графа, например, в виде запрета на отрицательные веса дуг.

Основными направлениями развития исследования является совершенствование и повышение строгости математического аппарата для обеспечения его совместимости со смежными дисциплинами информационных технологий.

6. Выводы

1. Разработаны математические модели процедур синтеза структур знаний всех уровней. Показано, что математические модели процедур опираются на минимальный набор стандартных действий по отношению к графовой структуре уровней знаний. Решены подзадачи разработки моделей эволюционного наследования концептов, графов и онтологий уровней БЗ. Для указанных подзадач разработаны формально-лингвистические модели, доказано подобие форм репрезентации знаний и эволюционное наследование в рамках общей инкорпорации онтологий.

2. Разработана базовая модель элементарного сигнального графа базы знаний. Введены формализмы параметра маркировки и функции маркировки элементарного сигнального графа БЗ. Обосновано правило распространения сигнала, основанное на потенциалах узлов, которые задаются функцией маркировки и могут динамически изменяться в процессе прохождения сигнала.

3. Обоснована и разработана модель маркировки сигнального графа базы знаний. Разработанная модель включает в себя маркировку узлов и ветвей графа, путем придания им параметров маркировки – значения концепта, потенциала узла, порога чувствительности узла, признака активности узла, проводимости (передачи) ветви. Заданы формальные определения указанных параметров маркировки. Формальные определения выражены функциями маркировки, отображающими конкретный узел или ветвь графа в набор их параметров маркировки.

4. Разработаны структурная и функциональная модели метаправил на основе модели элементарного сигнального графа. На базе разработанной модели предложена базовая модель распространения потока логического вывода между концептами онтологии в элементарном графе БЗ, что дало возможность сформировать набор формальных моделей множества базовых операций на сигнальном графе БЗ, необходимых для интерпретации и исчисления форм знаний.

Литература

1. Бартоломей П. И., Тащилин В. А. Информационное обеспечение задач электроэнергетики: учеб. пос. Екатеринбург, 2015. 108 с.
2. Morkun V., Tron V. Ore preparation multi-criteria energy-efficient automated control with considering the ecological and economic factors // Metallurgical and Mining Industry. 2014. Issue 5. P. 4–7. URL: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/1-MorkunTron.pdf>
3. Besanger Y., Eremia M., Voropai N. Major Grid Blackouts: Analysis, Classification, and Prevention // Handbook of Electrical Power System Dynamics. 2013. P. 789–863. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118516072.ch13>
4. Смолоник С. В. Роль «человеческого фактора» в развитии крупных системных аварий // ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА. 2008. Vol. 1, Issue 1. P. 16–19.
5. Аварійність на об'єктах електроенергетики України у 2005 році. Галузевий інформаційний документ // Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». К.: Видавництво «Енергія», 2005. 102 с.
6. Kalibataitè G. The Importance of Meta-Knowledge for Business and Information Management // Social Technologies. 2011. Vol. 1, Issue 1. P. 163–178.
7. Nasrollahi S. N., Mokhtari H., Seyedein M. Meta-analysis: An Approach to Synthesizing and Evaluating Research on Knowledge and Information Science // Iranian Journal of Information Processing & Management. 2011. Vol. 29, Issue 2. P. 293–316.
8. Morkun V., Tcvirkun S. Investigation of methods of fuzzy clustering for determining ore types // Metallurgical and Mining Industry. 2014. Issue 5. P. 12–15. URL: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/3-MorkunTs.pdf>
9. Open Data as a key factor for developing expert systems: a perspective from Spain / Rodriguez-Rojas L. A., Cueva-Lovelle J. M., Tarazona-Bermudez G. M., Montenegro-Marin C. E. // International Journal of Interactive Multimedia and

Artificial Intelligence. 2013. Vol. 2, Issue 2. P. 51. doi: <https://doi.org/10.9781/ijimai.2013.226>

10. Ligeza A. Knowledge Representation and Inference for Analysis and Design of Database and Tabular Rule-Based Systems // Computer Science. 2001. Vol. 3, Issue 1. P. 13–60.

11. Miah S. J., Genemo H. A Design Science Research Methodology for Expert Systems Development // Australasian Journal of Information Systems. 2016. Vol. 20. doi: <https://doi.org/10.3127/ajis.v20i0.1329>

12. Morkun V., Morkun N., Tron V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Issue 5. P. 7–11. URL: http://www.metaljournal.com.ua/assets/MMI_2014_6/MMI_2015_5/001-Morkun.pdf

13. Кузнецов О. П., Суховеров В. С., Шипилина Л. Б. Онтология как систематизация научных знаний: структура, семантика, задачи // Труды конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения». М.: ИПУ РАН, 2010. С. 762–773.

14. The impact of knowledge management processes on information systems: A systematic review / Al-Emran M., Mezhuyev V., Kamaludin A., Shaalan K. // International Journal of Information Management. 2018. Vol. 43. P. 173–187. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.08.001>

15. Sedighi S. M., Javidan R. Semantic query in a relational database using a local ontology construction // South African Journal of Science. 2012. Vol. 108, Issue 11/12. doi: <https://doi.org/10.4102/sajs.v108i11/12.1107>

16. From reference ontologies to ontology patterns and back / Ruy F. B., Guizzardi G., Falbo R. A., Reginato C. C., Santos V. A. // Data & Knowledge Engineering. 2017. Vol. 109. P. 41–69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.datak.2017.03.004>

17. Duer S., Wrzesień P., Duer R. Creating of structure of facts for the knowledge base of an expert system for wind power plant's equipment diagnosis // E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 19. P. 01038. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171901038>

18. Xamena E., Brignole N. B., Maguitman A. G. A Structural Analysis of topic ontologies // Information Sciences. 2017. Vol. 421. P. 15–29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.08.081>

19. Gadomski A. M. From Know-how to How-to- Know: An Approach to Knowledge Ordering for Specification of Complex Problems (TOGA methodology) // Presented at the International Symposium on Computational Intelligence. Milan, 1989.

20. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта. Математические средства. Х., 1984. 144 с.

21. Дударь З. В., Калиниченко О. В., Шабанов-Кушнарченко С. Ю. О методе и задачах теории интеллекта. I. // Радиоэлектроника и информатика. 2000. № 2. С. 112–122.

22. Шабанов-Кушнарченко С. Ю., Кудхаир Абед Тамер, Лещинская И. А. Предикатный подход к формализации неявных знаний // Системи обробки інформації. 2013. Вип. 9. С. 113–116.

23. Башмаков А. И., Башмаков И. А. Интеллектуальные информационные технологии: учеб. пос. М., 2005. 304 с.

24. Genesereth M. R., Fikes R. E. Knowledge Interchange Format. Reference Manual. Computer Science Department, Stanford University Stanford, California, 1992. 68 p.

25. Яловец А. Л. Представление и обработка знаний с точки зрения математического моделирования проблемы и решения. Киев: Наукова думка, 2011. 339 с.

26. Emergence and complex systems: The contribution of dynamic graph theory / Gignoux J., Chérel G., Davies I. D., Flint S. R., Lateltin E. // Ecological Complexity. 2017. Vol. 31. P. 34–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2017.02.006>

27. Wiener G. On constructions of hypotraceable graphs // Electronic Notes in Discrete Mathematics. 2016. Vol. 54. P. 127–132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.endm.2016.09.023>

Тільки для читання