

ПОИСК РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛОГИЙ И ПРЕЦЕДЕНТОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

А.П. Еремеев, П.Р. Варшавский

Александр Павлович Еремеев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Московского энергетического института (технического университета). Руководитель проектов 02-07-90042, 05-07-90232.

Павел Романович Варшавский, кандидат технических наук, ассистент той же кафедры.

Изучение механизмов, участвующих в процессе построения умозаключений на основе аналогий и прецедентов, является важной задачей, как для психологов, так и для специалистов в области искусственного интеллекта (ИИ) [1–4]. Психологи пытаются разобраться в данных механизмах, чтобы понять, каким образом чело век рассуждает и учится. Специалисты в области ИИ занимаются моделированием рассуждений на основе аналогий и прецедентов с помощью компьютерных средств, чтобы обеспечить разработку более гибких моделей рассуждений и обучения. Аналогии и прецеденты могут использоваться в различных приложениях ИИ для решения разно образных задач: поиск решения в незнакомых ситуациях, генерация гипотез о незнакомой предметной области, обобщение накопленного опыта и т.д. Большой интерес к моделям рассуждений на основе аналогий и прецедентов обусловлен также тем, что на сегодняшний день весьма актуальна проблема моделирования человеческих рассуждений в интеллектуальных системах различного типа и, в частности, в интеллектуальных системах поддержки принятия решений (ИСППР) [1, 4].

Вопросы о природе аналогии, ее формальном определении, правомерности использования рас суждений (вывода) по аналогии возникли довольно давно и были весьма актуальны еще во времена эпикурейцев и стоиков. Начиная с первой попытки формализовать понятие аналогии, предпринятой Лейбницем, и до настоящего времени не удалось дать исчерпывающего формального определения этому понятию.

В большом энциклопедическом словаре аналогия (греч. analogia — соответствие, сходство, подобие, близость) определяется как сходство предметов (явлений, процессов) в каких-либо свойствах. Умозаключением по аналогии называется перенос знаний, полученных из рассмотрения какого-либо объекта, на менее изученный, сходный по существенным свойствам, качествам объект. Такие умозаключения являются одним из источников научных гипотез. В энциклопедии Брокгауза и Эфрона аналогия означает первоначально соответствие, подобие или равенство в известных отношениях одной вещи с другой. Заключение, делаемое на основании подобия или равенства двух вещей в известных отношениях о подобии их в других отношениях или о дальнейшем, еще большем, их сходстве и называемое в логике аналогическим заключением, может быть признано лишь заключением вероятным, которым в области исследования нередко приходится пользоваться.

Рассуждение на основе аналогий можно определить как метод, позволяющий понять некоторую сложившуюся ситуацию в сравнении с другой подобной ситуацией [5]. Иными словами, рассуждение на основе аналогий определяется как метод вывода, который позволяет обнаружить подобие между несколькими заданными объектами и благодаря переносу фактов (знаний), справедливых для одних объектов, на основе этого подобия на другие объекты, определить способ решения задачи или предсказать неизвестные факты. Именно такой естественный метод вывода человек использует на первых порах, сталкиваясь с неизвестной задачей.

Несмотря на то, что метод аналогий интуитивно понятен каждому и довольно активно применяется людьми в повседневной жизни (в так называемых рассуждениях «здравого смысла»), понятие аналогии, как это уже отмечалось, не поддается исчерпывающему формальному определению. На данный момент существует достаточно большое количество различных моделей, схем и методов рассуждений на основе аналогий, отражающих в той или иной степени данный механизм [3, 6—14].

Рассуждения на основе прецедентов (CBR — casebased reasoning) является подходом, позволяющим решить новую, неизвестную задачу, используя или адаптируя решение уже известной задачи. В большинстве энциклопедических источников, включая большой энциклопедический словарь, *прецедент* (от латинского *praecedentis* — предшествующий) определяется как случай, имевший место ранее и служащий примером или оправданием для последующих случаев подобного рода. Такие рассуждения, как и рассуждения на основе аналогий, базируются на понятии аналогии, однако методы их реализации имеют отличия [14].

Первые и наиболее известные интеллектуальные системы для рассуждения на основе аналогий типа *ARGUS* и *ANALOGY* [6] базировались на пропорции, предложенной Лейбницем. Довольно активно аналогия использовалась для решения задач автоматического доказательства теорем и программирования интеллектуальных роботов. Отметим, например, известные работы Р. Клинга (R. Kling) [7], Д. Плейстида (D. Plaisted) [8], Дж. Карбонелла (J. Carbonell) [9] и др. Начиная с работ П. Уинстона (P. Winston) [10], быстро развивается и применяется структурная аналогия. В последнее время среди отечественных и зарубежных программных средств, моделирующих рассуждения на основе аналогий, можно выделить средства, ориентированные на интеллектуальные системы понимания естественного языка [10, 11], машинного обучения [12], выдвижения гипотез о предметной области на основе эмпирических данных [3]. Активно разрабатываются нейросетевые и гибридные модели на основе аналогий [13].

В то же время отсутствуют достаточно развитые средства поиска решения на основе аналогий и прецедентов для ИСППР, особенно для ИСППР реального времени (ИСППР РВ), характеризующихся, как правило, жесткими ограничениями на время поиска решения [14]. Кроме того, ощущим недостаток отечественных программных средств, сопоставимых с зарубежными системами.

Здесь мы рассмотрим методы поиска решения на основе структурной аналогии и прецедентов, ориентированные на применение в ИСППР типа ИСППР РВ. Отметим, что при использовании данных методов в ИСППР РВ не обходимо учитывать ряд требований, предъявляемых к таким системам [4]:

- необходимость получения решения в условиях временных ограничений, определяемых реальным управляемым процессом, и учета временного фактора, как при описании проблемной ситуации, так и в процессе поиска решения;
- невозможность получения всей объективной информации, необходимой для решения, и, в связи с этим, использование субъективной, экспертной информации;
- многовариантность поиска, необходимость применения методов правдоподобного поиска (вывода) решения и активного участия в нем лиц, принимающих решения (ЛПР);
- наличие недетерминизма, необходимость коррекции и введения дополнительной информации в базу знаний при поиске решения.

Обобщенная структура ИСППР РВ представлена на рис.1. Поиск решения на основе аналогий и прецедентов может быть применен в блоках анализа проблемной ситуации, поиска решения, обучения, адаптации и модификации, моделирования и прогнозирования. Использование таких методов расширяет возможности ЛПР и повышает эффективность принятия решений в различных проблемных ситуациях (нештатных, аномальных, критических). Особое

внимание будет уделено эффективным методам вывода на основе структурной аналогии, учитывающим контекст.

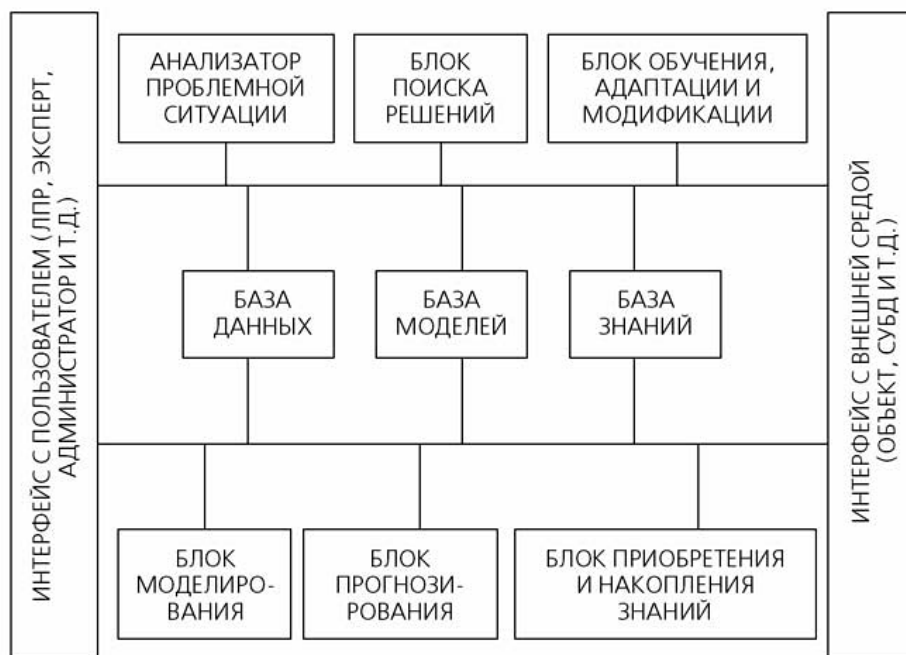


Рис. 1. Базовая архитектура ИСППР РВ.

Типы аналогий

В зависимости от характера информации, переносимой с одного объекта на другой, можно выделить аналогии свойств и аналогии отношений. В *аналогии свойств* рассматриваются два единичных объекта или два множества (класса) однородных объектов, а переносимыми признаками являются свойства этих объектов. Например, аналогии в симптомах протекания болезни у людей или в структуре поверхности Земли и Марса. В *аналогии отношений* рассматриваются отношения между парами объектов, причем сами объекты, для которых эти отношения имеют место, могут быть совершенно разными, а переносимыми признаками являются свойства этих отношений. Например, используя аналогию отношений, бионика изучает процессы в живой природе с целью использования полученных знаний в современных технических системах.

По степени достоверности заключений можно говорить о строгой или нестрогой научной аналогии и о ненаучной аналогии. *Строгая научная аналогия* применяется в научных исследованиях и в математических доказательствах. Эта аналогия дает достоверный вывод, т.е. на ее основе выводится достоверное (истинное) заключение. Например, формулировка признаков подобия треугольников основана на строгой аналогии.

В отличие от строгой, *нестрогая научная аналогия* дает лишь правдоподобное (вероятное) заключение. Если вероятность ложного заключения считать равной 0, а истинного заключения — равной 1, то вероятность вывода по нестрогой аналогии лежит в интервале от 0 до 1. Для повышения надежности заключения необходимо следование определенным требованиям, предъявляемым к данному методу рассуждений [5, 14], иначе аналогия может стать *ненаучной*, вероятность заключения для которой невелика и зачастую близка к 0. Ненаучные аналогии иногда делаются умышленно с целью запутывания оппонента, а иногда непреднамеренно из-за незнания правил построения аналогии или отсутствия фактических знаний относительно объектов и их свойств.

Если знания о предметной области представимы в структурированном виде, то имеет место *структурная аналогия*. Здесь мы рассмотрим структурную аналогию на основе свойств и отношений.

Рассуждения на основе прецедентов

Как правило, методы рассуждения на основе прецедентов включают в себя четыре основных этапа, образующие так называемый CBR-цикл [14], структура которого представлена на рис.2.

Основными этапами CBR-цикла являются:

- извлечение наиболее соответствующего (подобного) прецедента (прецедентов) для сложившейся ситуации из библиотеки прецедентов (БП);
- повторное использование извлеченного прецедента для попытки решения текущей проблемы;
- пересмотр и адаптация в случае необходимости полученного решения в соответствии с текущей проблемой;
- сохранение вновь принятого решения как части нового прецедента.

Основной целью использования аппарата прецедентов в ИСППР является выдача готового решения ЛПР (оператору, диспетчеру) для текущей ситуации на основе прецедентов, которые уже имели место в прошлом при управлении данным объектом или процессом.



Рис .2. Структура CBR-цикла.

Поиск решения на основе прецедентов заключается в определении степени сходства текущей ситуации с ситуациями прецедентов из БП. При этом учитываются веса параметров для ситуаций из БП, заданные экспертом. Степень сходства зависит от близости текущей ситуации к ситуации прецедента и определяется с помощью алгоритма поиска ближайшего соседа посредством простого по координатному сопоставлению текущей ситуации с ситуацией прецедента (каждый параметр для описания ситуаций из БП рассматривается как одна из координат). В результате определяется расстояние D между текущей ситуацией и ситуацией прецедента и максимальное расстояние D_{\max} на основе границ диапазонов параметров для ситуаций прецедентов. Затем вычисляется значение степени сходства $SIM = 1 - D/D_{\max}$.

Необходимо учитывать, что рассуждение на основе прецедентов может не привести к необходимому решению для возникшей проблемной ситуации, например, в случае отсутствия подобной (аналогичной) ситуации в БП. Данная проблема может быть разрешена, если в СВР-цикле предусмотреть возможность пополнения БП непосредственно в процессе рассуждения (вывода) [14]. Одним из способов пополнения БП является привлечение более мощного в плане обнаружения новых фактов (знаний) метода на основе аналогий. В свою очередь в методах рассуждений на основе аналогий могут весьма успешно применяться и прецеденты, т.е. эти методы дополняют друг друга, и их интеграция в ИСППР весьма перспективна.

Поиск решения на основе структурной аналогии с учетом контекста

Рассмотрим более подробно методы поиска решения на основе структурной аналогии, позволяющие учитывать контекст и базирующиеся на теории структурного отображения [11, 12, 14].

Структурная аналогия задается четверкой $A = \langle O, C, R, p \rangle$, где O и R — соответственно объект-источник и объект-приемник для аналогии, C — объект-пересечение, т.е. объект, структурно пересекающийся с объектом-источником и объектом-приемником и имеющий большую мощность множества свойств по сравнению с ними [11]. Другими словами, аналогия между объектом источником и объектом-приемником проводится в контексте объекта пересечения, а p является свойством для определения первоначального контекста. Структура такой аналогии представлена на рис.3.

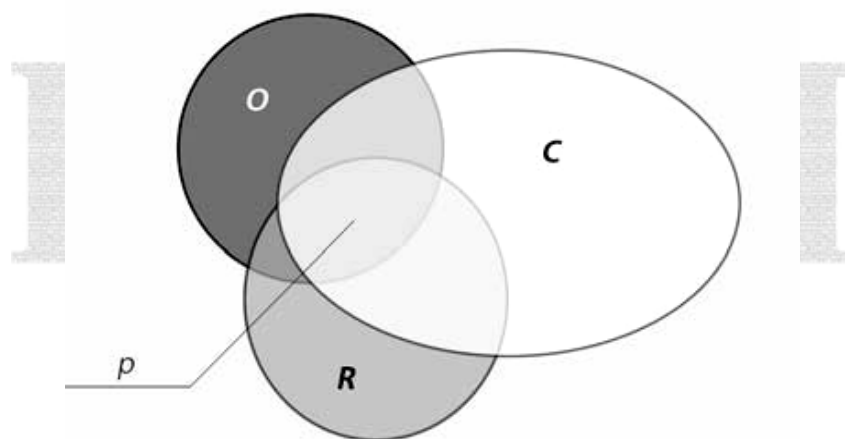


Рис.3. Структура аналогии с использованием контекста.

В качестве модели представления знаний о структурной аналогии целесообразно выбрать *семантическую сеть* (СС), обладающую таким важным и отличающим ее от других моделей представления знаний (в частности, продукционных и логических) достоинством, как естественность представления структурированных знаний и достаточно простое их обновление в относительно однородной среде [15]. Последнее свойство особенно важно для ИСППР РВ, ориентированных на открытые и динамические предметные области.

Известно, что СС может быть представлена в виде графовой структуры $\langle V, E \rangle$ с помеченными вершинами V и дугами E . Вершины могут отображать объекты (понятия, события, действия и т.д.) предметной области, а дуги — отношения между объектами.

Пусть P_v — множество свойств, которыми обладает объект $v \in V$, V_p — множество объектов СС, обладающих свойством p , V_v — множество объектов, пересекающихся с объектом $v \in V$. Объекты $v, v' \in V$ пересекаются на СС, если $P_{vv'} = P_v \cap P_{v'} \neq \emptyset$, где $P_{vv'}$ — множество общих свойств объектов v и v' , а P_v и $P_{v'}$ — множества свойств объектов v и v' соответственно.

Структуру СС рассмотрим на примере, взятом из области энергетики, — оперативном управлении атомным энергоблоком [14, 16]. На рис.4 представ лен метауровень СС (универсальный класс) и фрагмент СС, отображающий четыре ситуации, возникшие в процессе функционирования системы автоматического охлаждения зоны реактора (САОЗ). Классы на СС отображаются темными круглыми вершинами, объекты — светлыми, значения атрибутов — темными квадратными вершинами, а светлыми квадратными вершинами отображаются вершины для описания событий на СС. Дуги (стрелки) без пометки означают отношение принадлежности.

Множество объектов-кандидатов на роль пересечения C для аналогии A обозначим V_C , на роль источника O для A — V_O , а множество аналогий A обозначим V_A . Множество $P_{OCR} = P_O \cap P_C \cap P_R$ содержит свойства, определяющие контекст для аналогии A .

На основе описанной структурной аналогии создан *алгоритм поиска решения с учетом контекста*, базирующийся на аналогии свойств [11]. Входными данными для алгоритма является СС с информацией о предметной области, приемник R и свойство p для определения первоначального контекста.

Алгоритм состоит из следующих шагов.

Шаг 1. $V_C = \emptyset$, $V_O = \emptyset$, $V_A = \emptyset$. Определить V_p , т.е. все объекты СС, кроме R , обладающие свойством p . Если таких объектов нет, то поиск решения завершить неудачей (без нахождения аналогий), иначе перейти к шагу 2.

Шаг 2. Из найденных на первом шаге объектов сформировать множество V_C , учитывая, что $(n_R \leq n_C) \& \neg(n_R \ll n_C) \& (n_{RC} < n_R) \& (n_{RC} > 1)$, где n_R и n_C обозначают соответственно количество свойств R и C , а n_{RC} — количество общих свойств R и C , $\neg(n_R \ll n_C)$ означает, что R не должен быть много меньше C (таким образом, исключается возможность поглощения пересечением приемника, так как при этом повышается вероятность получения ненаучной аналогии). Если $V_C = \emptyset$, то поиск решения завершить неудачей, иначе перейти к шагу 3.

Шаг 3. Из найденных на первом шаге объектов сформировать множество $V_O = V_p \setminus \{R\}$ и перейти к шагу 4.

Шаг 4. С помощью полученных на предыдущих шагах множеств V_C и V_O сформировать множество аналогий V_A , включая в это множество аналогию $A = \langle O, C, R, p \rangle$ только в том случае, если $(n_O \leq n_C) \& \neg(n_O \ll n_C) \& (n_{OC} < n_O) \& (n_{OC} > 1) \& (n_{OC} < n_{RC})$, где n_O — количество свойств O , а n_{OC} — количество общих свойств O и C , $\neg(n_{OC} \ll n_C)$ означает, что O не должен быть много меньше C (остальные обозначения аналогичны введенным ранее), и имеется другая аналогия $A' = \langle O', C, R, p \rangle$, отличающаяся от A тем, что у нее другой источник $O' \neq O$. Если $V_A \neq \emptyset$, то найдены аналогии для R и следует перейти к шагу 5, иначе поиск решения завершить неудачей.

Шаг 5. Полученные на предыдущем шаге аналогии (которые могут быть предварительно сравнены между собой с учетом контекста) выдать ЛПП, что означает успешное завершение алгоритма поиска решения.

Пользователь (ЛПП) из выданных ему аналогий делает окончательный выбор наилучших с его точки зрения аналогий, и на их основе осуществляется перенос фактов (свойств), справедливых для источника, на приемник аналогии (т.е. $P_R = P_R \cup P_O \setminus P_{RO}$).

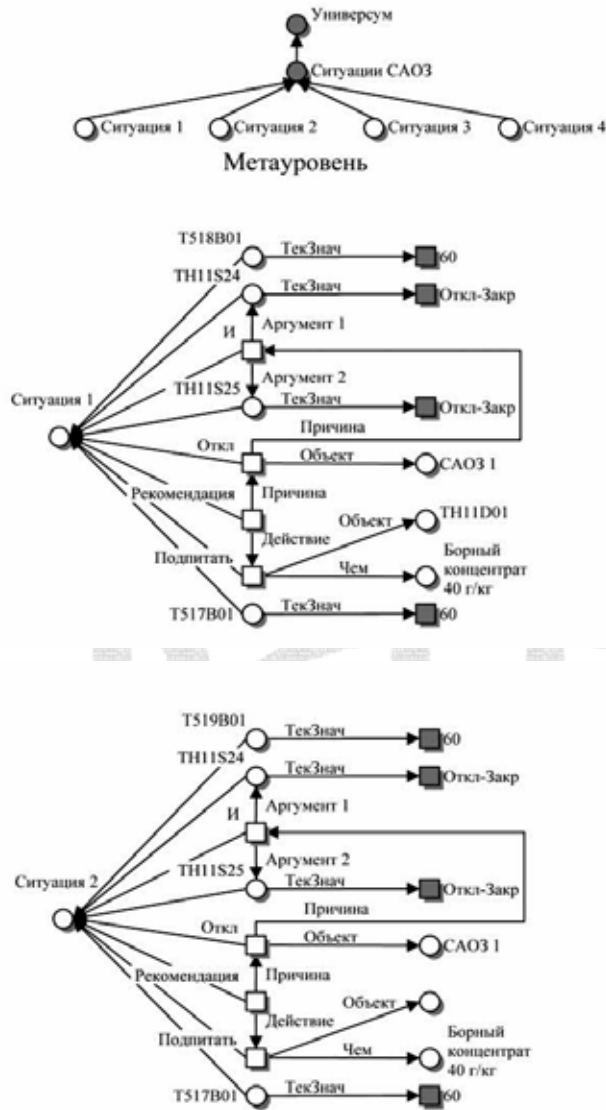
Установлено, что данный алгоритм имеет полиномиальную оценку вычислительной сложности $O(n^2)$ (что позволяет его практическое применение в системах реального времени), где n — количество объектов, обладающих свойством p для определения первоначального контекста [11].

Рассмотрим модифицированную (расширенную) структурную аналогию с учетом контекста $A = \langle O, C, R, P \rangle$ [14]. Модификация заключается в том, что вместо свойства p для опре-

деления первоначального контекста рассматривается множество свойств P , которое определяет первоначальный контекст аналогии и может быть пустым.

Данная модификация позволяет:

- более детально уточнить первоначальный контекст и тем самым сократить время поиска решения, что важно для ИСППР РВ;



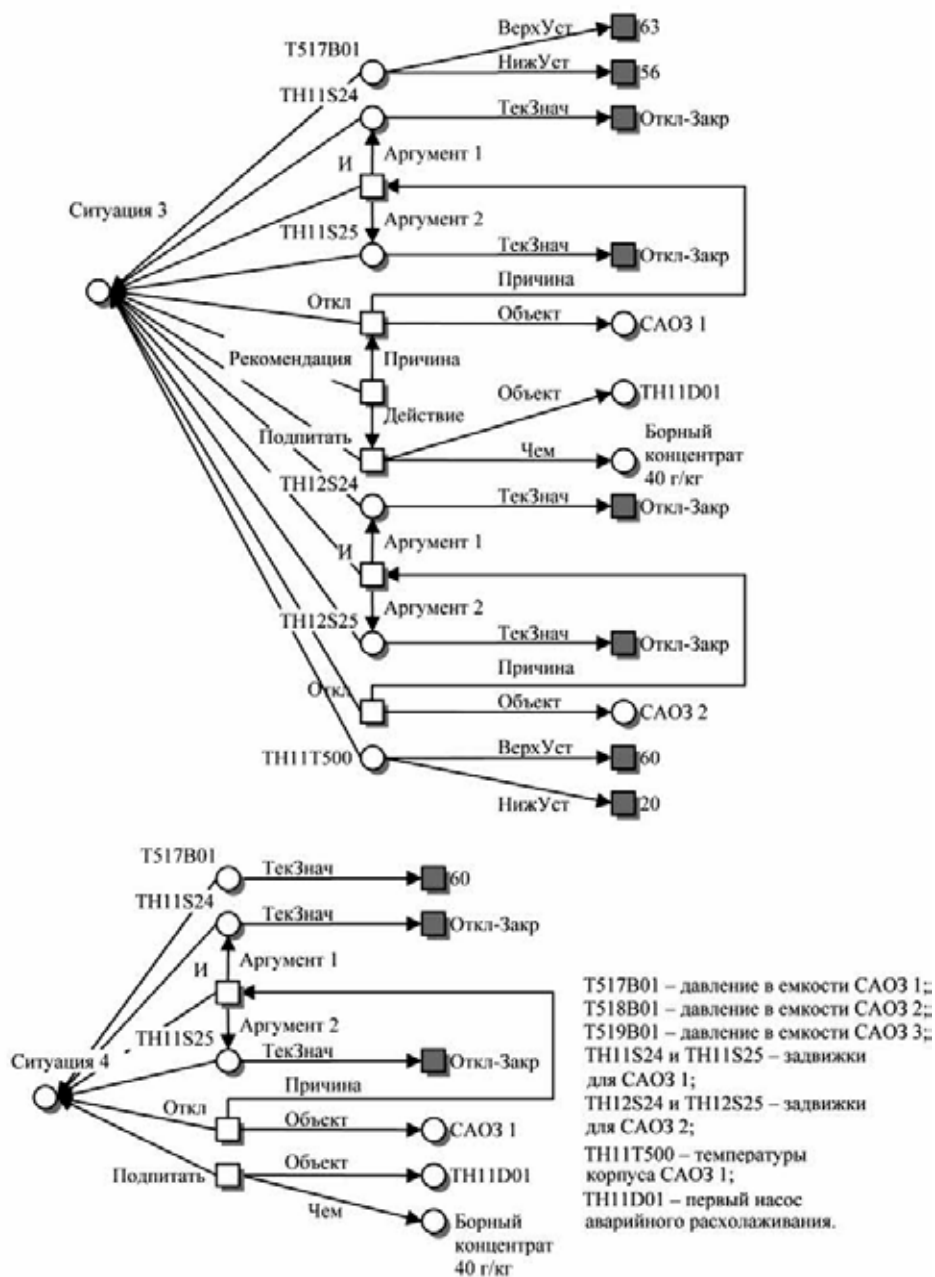


Рис.4. Фрагмент семантической сети, представляющий метауровень и ситуации, возникшие в процессе функционирования SAO3.

— осуществить поиск решения на основе аналогий без уточнения первоначального контекста (т.е. найти потенциальные источники для аналогии) и в результате получить аналогии в различных контекстах, хотя это и потребует больших затрат вычислительных ресурсов.

Помимо отмеченного, в модифицированной структуре предполагается осуществлять перенос от источника O на приемник R фактов (свойств), уместных в контексте C (т.е. определить $P_R = P_R \cup (P_{OC} \setminus P_{OCR})$), в отличие от базового варианта, в котором уместность свойств в контексте не рассматривается ($P_R = P_R \cup (P_o \setminus P_{RO})$).

В соответствии с модифицированной структурой аналогии разработан алгоритм поиска решения на основе структурной аналогии с учетом контекста и ограничения на время поиска решения (алгоритм 2), ориентированный на применение в рамках ИСППР РВ [14]. Максимальная оценка вычислительной сложности алгоритма 2 соответствует $O(n^2)$, где n — число объектов, обладающих свойствами P для определения первоначального контекста. В случае, когда задан источник O , сложность алгоритма имеет линейную оценку $O(n)$.

Для нахождения решения на основе структурной аналогии в случае пустого множества свойств P , необходимого для определения первоначального контекста, разработан алгоритм поиска на основе структурной аналогии с учетом ограничения на время поиска решения (алгоритм 3), использующий метод минимальных пересечений [17] и позволяющий выявить наиболее важные свойства для построения аналогий [14]. Алгоритм 3 также имеет полиномиальную оценку.

Методы оценки полученных аналогий

Рассмотрим возможности оценки аналогий с учетом контекста. После получения аналогий для приемника R , содержащихся в V_A , возникает задача выбора из этого множества наиболее предпочтительных аналогий, которое обозначим V_A^* . Введем отношение предпочтения на множестве аналогий с учетом контекста.

Аналогия $A = \langle O, C, R, P \rangle$ предпочтительнее аналогии $A' = \langle O', C', R, P \rangle$ ($A > A'$) тогда и только тогда, когда $n_{OCR} > n_{O'C'R}$, где n_{OCR} и $n_{O'C'R}$ — число свойств в множествах P_{OCR} и $P_{O'C'R}$, которые определяют контекст для аналогий A и A' . Аналогия $A = \langle O, C, R, P \rangle$ и аналогия $A' = \langle O', C', R, P \rangle$ равнозначны (несравнимы) тогда и только тогда, когда $n_{OCR} = n_{O'C'R}$.

Для случая, когда у аналогий могут быть разные приемники R и R' и разные множества свойств P и P' для определения первоначального контекста, отношение предпочтения определяется следующим образом.

Аналогия $A = \langle O, C, R, P \rangle$ предпочтительнее аналогии $A' = \langle O', C', R', P' \rangle$ ($A > A'$) тогда и только тогда, когда $k_{OCR} > k_{O'C'R'}$, где $k_{OCR} = n_{OCR} / (n_{RC} + n_{OC} - n_{OCR})$, $k_{O'C'R'} = n_{O'C'R'} / (n_{R'C'} + n_{O'C'} - n_{O'C'R'})$. Величина k_{OCR} отражает аналогичность (схожесть) в заданном контексте приемника R и источника O и может быть выражена в процентах, а n_{OCR} и $n_{O'C'R'}$ — число свойств во множествах P_{OCR} и $P_{O'C'R'}$, определяющих контекст для аналогий A и A' , n_{RC} , $n_{R'C'}$, n_{OC} , $n_{O'C'}$ — число свойств во множествах P_{RC} , $P_{R'C'}$, P_{OC} , $P_{O'C'}$ соответственно. Аналогия $A = \langle O, C, R, P \rangle$ и аналогия $A' = \langle O', C', R', P' \rangle$ равнозначны (несравнимы) тогда и только тогда, когда $k_{OCR} = k_{O'C'R'}$.

Рассмотрим процедуру оценки аналогий с учетом контекста для двух аналогий на вышеописанном примере из области энергетики (см. рис.4).

Для аналогии $A_1 = \langle \text{Ситуация 1, Ситуация 3, Ситуация 4, } P \rangle$:
 $P = \{ \text{ТекЗнач ТН11S24 Откл-Закр} \}$,

$P_{\text{Ситуация 1, Ситуация 3, Ситуация 4}} = \{ \text{Откл САОЗ 1, Подпитать ТН11D01 Борный концентрат 40 г/кг, И ТН11S24 ТН11S25, ТекЗнач ТН11S24 Откл-Закр, ТекЗнач ТН11S25 Откл-Закр} \}$,

$P_{\text{Ситуация 1, Ситуация 3}} = \{ \text{Откл САОЗ 1, Подпитать ТН11D01 Борный концентрат 40 г/кг, И ТН11S24 ТН11S25, ТекЗнач ТН11S24 Откл-Закр, ТекЗнач ТН11S25 Откл-Закр, Рекомендация Подпитать ТН11D01 Борный концентрат 40 г/кг} \}$,

$P_{\text{Ситуация 4, Ситуация 3}} = \{ \text{Откл САОЗ 1, Подпитать ТН11D01 Борный концентрат 40 г/кг, И ТН11S24 ТН11S25, ТекЗнач ТН11S24 Откл-Закр, ТекЗнач ТН11S25 Откл-Закр} \}$,

$n_{\text{Ситуация 1, Ситуация 3, Ситуация 4}} = 5$, $n_{\text{Ситуация 1, Ситуация 3}} = 6$, $n_{\text{Ситуация 4, Ситуация 3}} = 5$,

$k_{\text{Ситуация 1, Ситуация 3, Ситуация 4}} = n_{\text{Ситуация 1, Ситуация 3, Ситуация 4}} / (n_{\text{Ситуация 4, Ситуация 3}} + n_{\text{Ситуация 1, Ситуация 3}} - n_{\text{Ситуация 1, Ситуация 3, Ситуация 4}}) = 5 / (5 + 6 - 5) = 0,8333$ (83,33%).

Для аналогии $A_2 = \langle \text{Ситуация 2, Ситуация 3, Ситуация 4, } P \rangle$ подобным образом получим оценку $k_{\text{Ситуация 2, Ситуация 3, Ситуация 4}} = 83,33\%$.

В результате получили, что аналогии A_1 и A_2 являются равнозначными (их сравнительные оценки имеют одинаковое значение 83,33%), поэтому они обе могут быть внесены в V_A^*

(т.е. $V_A^* = \{A_1, A_2\}$) и представлены ЛПР для окончательного выбора предпочтительной с его точки зрения аналогии.

Предложен метод оценки аналогий с учетом важности параметров объекта [14]. Метод базируется на заданных пользователем (экспертом, ЛПР) значениях важности параметров приемника R , для которого требуется найти аналогии. Эти значения задаются пользователем в диапазоне от 0 до 1 (от 0 до 100%) и по умолчанию считаются равными нулю.

После того как найдены аналогии, для них можно получить оценки важности imp , зависящие от важности параметров, включенных во множество $POCR$, определяющее контекст для аналогии:

$$imp = (imp_P / imp_{\max} \times 100)\%,$$

где imp_P — сумма значений важности всех параметров, входящих в $POCR$, imp_{\max} — сумма значений важности всех параметров P_R приемника R .

Рассмотрим получение сравнительных оценок для аналогий с учетом важности параметров объекта на следующем примере. Приемник R описывается параметрами: $\{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$, а значение важности этих параметров в процентах — $\{80, 0, 10, 0, 5\}$. Пусть в результате применения алгоритма 2 поиска решения на основе структурной аналогии с учетом контекста получены две аналогии — A_1 и A_2 . Определим для них оценки важности imp : $A_1 = \langle O_1, C_1, R, P \rangle$, $P_{O_1C_1R} = \{p_1, p_3\}$, $imp_1 = 90/95 = 0,9474$ (94,74%); $A_2 = \langle O_2, C_2, R, P \rangle$, $P_{O_2C_2R} = \{p_2, p_3, p_4, p_5\}$, $imp_2 = 15/95 = 0,1579$ (15,79%).

Из приведенного примера видно, что аналогия A_1 предпочтительнее аналогии A_2 , так как множество, определяющее контекст для аналогии A_1 , содержит наиболее важные параметры объекта (несмотря на то, что мощность множества $P_{O_1C_1R}$, определяющего контекст для аналогии A_1 , меньше множества $P_{O_2C_2R}$, определяющего контекст для аналогии A_2).

Поиск решения на основе аналогий, базирующийся на теории структурного отображения

Теория структурного отображения (SMT — *structure mapping theory*) [12] позволяет формализовать набор неявных ограничений, которыми пользуется человек, оперируя понятиями аналогии и подобия. В SMT предполагается, что аналогия является отображением знаний одной предметной области (базы) в другую область (цель), основанным на системе отношений, имеющихся между объектами базы и цели, а также что человек (ЛПР) предпочитает оперировать некоторой целостной системой взаимосвязанных отношений, а не простым набором поверхностных и слабо связанных фактов.

Процесс вывода на основе аналогий в рамках SMT включает следующие этапы:

- определение потенциальных аналогов;
- отображение и вывод;
- оценка «качества» соответствия.

Рассмотрим механизм структурного отображения (SME — *structure mapping engine*) [18], базирующийся на SMT. Этот механизм предназначен для моделирования рассуждений на основе аналогий и позволяет сформировать наиболее общие соответствия для структурированных представлений базовой и целевой областей, а также оценить полученные соответствия. Входными данными для SME-алгоритма являются структурные представления базовой и целевой областей.

SME-алгоритм (алгоритм 4) состоит из следующих этапов:

Этап 1. Построение множества локальных соответствий — гипотез соответствия МНs. На данном этапе определяются соответствия между элементами в базовой и целевой об-

ластях с помощью правила: «если два отношения имеют одинаковое имя, то создается гипотеза соответствия между ними». Затем для каждой гипотезы соответствия проверяются аргументы отношений, и если их количество и тип совпадают, то создается гипотеза локальных соответствий.

Далее определяется оценка правдоподобия локальных соответствий с использованием следующих правил и коэффициентов, задаваемых экспертом:

— увеличить оценку правдоподобия для соответствия, если базовый и целевой элементы имеют одинаковые имена;

— увеличить оценку правдоподобия для соответствия, если хотя бы у одного базового элемента имеется родительское отношение (т.е. данный элемент является потомком элемента более высокого уровня, называемого родителем).

Этап 2. Построение множества глобальных соответствий $Gmaps$. Формируется множество $Gmaps$, использующее совместимые пары объектов $Emaps$.

Этап 3. Построение множества кандидатов заключения $Inferences$. С $Gmaps$ связывается множество $Inferences$ — фактов, которые имеются в базовой области, но не имеются изначально в целевой области.

Этап 4. Оценка глобальных соответствий. Вычисляется оценка для $Gmaps$, зависящая от оценок локальных соответствий MNs .

В результате формируются наиболее общие соответствия. К достоинствам алгоритма 4 относятся его полиномиальность и простота импортирования кандидатов заключения в целевую область.

Пример поиска решения на основе структурной аналогии

Рассмотрим на нашем примере из области энергетики (см. рис.4) работу алгоритма 1 (для алгоритма 2 получается аналогичный результат) поиска решения на основе структурной аналогии с учетом контекста.

В качестве приемника R для аналогии возьмем менее определенную *Ситуацию 4*, а в качестве свойства p — *ТекЗнач ТН11S24 Откл-Закр* (т.е. задвижка ТН11S24 закрыта).

На шаге 1 имеем: $V_C = \emptyset$, $V_O = \emptyset$, $V_A = \emptyset$, и определяем множество $V_p' = V_p \setminus \{Ситуация 4\}$, где $V_p = \{Ситуация 1, Ситуация 2, Ситуация 3, Ситуация 4\}$ — множество объектов СС, обладающих свойством p (т.е. $V_p' = \{Ситуация 1, Ситуация 2, Ситуация 3\}$).

На шаге 2 проверяем, подходят ли объекты из множества V_p' на роль пересечения C для аналогии, и в случае успеха добавляем эти объекты во множество V_C . В данном примере получим, что на роль пересечения подходит только *Ситуация 3* (т.е. $V_C = \{Ситуация 3\}$).

На шаге 3 формируем множество V_O из объектов множества V_p' . В результате получаем $V_O = \{Ситуация 1, Ситуация 2, Ситуация 3\}$.

На шаге 4 из объектов множеств V_C и V_O формируем аналогии для приемника R и в случае успеха добавляем эти аналогии во множество V_A . В нашем случае получим две аналогии:

$A_1 = \langle Ситуация 1, Ситуация 3, Ситуация 4, p \rangle$;

$A_2 = \langle Ситуация 2, Ситуация 3, Ситуация 4, p \rangle$.

Таким образом, $V_A = \{A_1, A_2\}$.

На шаге 5 для полученных аналогий A_1 и A_2 вычисляем сравнительные оценки, используя описанную ранее процедуру. Завершаем работу алгоритма выдачей полученных аналогий пользователю (ЛПР).

В результате получаем две равнозначные аналогии A_1 и A_2 , так как их сравнительные оценки одинаковы и равны 83%. На основе этих аналогий для *Ситуации 4* можно считать

справедливым новый факт — «Рекомендация подпитать насос ТН11D01 борным концентратом 40 г/кг».

Резюме

Рассмотрены методы поиска решения на основе структурной аналогии и прецедентов в плане применения их в современных ИСППР типа ИСППР РВ. Описаны базовые алгоритмы поиска решения на основе аналогии свойств (алгоритм 1) и аналогии отношений (алгоритм 4). Предложены более эффективные в плане качества получаемого решения алгоритмы 2 и 3. Алгоритмы используют модифицированную структурную аналогию, что позволяет учитывать множество свойств, определяющих первоначальный контекст аналогии, и обеспечивает поиск решения в случае, когда такое множество свойств является пустым, а также переносить от источника аналогии на приемник только те факты, которые уместны в контексте построенной аналогии. Предложены методы определения сравнительных оценок полученных аналогий с учетом контекста и важности параметров объекта. Реализована (в среде визуального программирования Borland C++ Builder 6.0 под ОС Windows NT/2000/XP) программная система поиска решения на основе аналогий и прецедентов, за регистрированная в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (свидетельство № 2005610761 от 31.03.2005 г.). Данная система использована в составе прототипа ИСППР РВ для мониторинга и управления сложными объектами типа энергоблоков [14].

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Поспелов Д.А. *Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов*. М., 1989.
- 2 Петренко В.Ф. *Личность человека — основа его картины мира // Модели мира*. М., 1997. С.9—24.
- 3 Финн В.К. // *Новости искусственного интеллекта*. 2004. №3. С.3—18.
- 4 Вагин В.Н., Еремеев А.П. // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2001. №6. С.114—123.
- 5 Уемов А.И. *Логические основы метода моделирования*. М., 1971.
- 6 Evans T. *A program for the solution of a class of geometric analogy intelligence test questions // Semantic Information Processing*. Cambridge, 1968. P.271—353.
- 7 Kling R.E. // *Artificial Intelligence*. 1971. V.2. P.147—178.
- 8 Plaisted D.A. // *Artificial Intelligence*. 1981. V.16. №1. P.47—108.
- 9 Carbonell J.G. *Learning by Analogy: Formulating and Generalizing Plans from Past Experience // Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*. V.1. Tioga; Palo Alto, 1983. P.137—161.
- 10 Winston P.H. // *Communications of the ACM*. 1980. V.23. №12. P.689—703.
- 11 Long D., Garigliano R. *Reasoning by analogy and causality: a model and application // Ellis Horwood Series in Artificial Intelligence*. 1994.
- 12 Gentner D. *The mechanisms of analogical learning // Knowledge acquisition and learning*. L., 1993. P.673—694.
- 13 Thagard P., Holyoak K., Nelson G., Gochfeld D. // *Artificial Intelligence*. 1990. V.46. P.259—310.
- 14 Варшавский П.Р., Еремеев А.П. *Поиск решения на основе структурной аналогии для интеллектуальных систем поддержки принятия решений // Известия РАН. Теория и системы управления*. 2005. №1. С.97—109.
- 15 Вагин В.Н. и др. *Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Ред. В.Н.Вагин, Д.А.Поспелов*. М., 2004.
- 16 Еремеев А.П., Денисенко Л.С. *Обработка недоопределенной информации в системе поддержки принятия решений реального времени применительно к оперативной службе электростанций // Известия РАН. Энергетика*. 2002. №2. С.32—43.
- 17 Аншаков О.М. // *ВИНИТИ НТИ. Сер.2*. 1999. №1—2. С.45—53.
- 18 Falkenhainer B., Forbus K., Gentner D. // *Artificial Intelligence*. 1989. V.41. P.1—63.