

УДК 004.8
MSC2010 68T20

© А. С. Клещев,¹ Е. А. Шалфеева²

Постановки практически полезных задач интеллектуальной деятельности

В статье показана актуальность построения классификации задач, основанной на общих принципах, единой и точно определённой с помощью математического аппарата терминологии. Предложен математический аппарат, позволяющий вводить математические абстракции для всех содержательных понятий, используемых в постановках задач. Предложена многоуровневая классификация задач, в которой базовая классификация задач выражена достаточно абстрактно. Далее на более низких уровнях абстракции введены и формально представлены частные свойства предметных областей и предложены уточнённые постановки задач и новые характерные задачи.

Ключевые слова: *интеллектуальная деятельность, экспертная система, классификация задач, постановка задачи.*

Введение

Проблематика экспертных систем была актуальна в 1970-80-е годы. В этот период были предложены некоторые классификации задач интеллектуальной деятельности, постановки и описания отдельных задач. Во многих этих работах был выдвинут тезис о том, что более полный обзор таких задач может позволить разработать методы решения задач и перейти в этой области от искусства разработки экспертных систем к технологии. В более позднее время продолжали публиковаться новые исследования, дающие свои версии классификации задач и их описаний. Эти публикации вносили вклад в развивающуюся инженерию знаний и предназначались для целей обучения [1, 2], а также для инженеров-программистов, нуждающихся в практическом руководстве по экспертным системам, подкреплённом

¹ФГБ УН Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5. Электронная почта: kleshev@iacp.dvo.ru

²ФГБ УН Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; ДВФУ, 690950 Владивосток, ул. Суханова, 8; ВГУЭС, 690014 Владивосток, ул. Гоголя, 41. Электронная почта: shalf@iacp.dvo.ru

теоретическим материалом [3]. К настоящему времени выполнено немало исследований и написан ряд обзорных работ, представляющих разные типы задач, решаемых интеллектуальными системами [1–6]. Однако нет единства ни в количестве, ни в спектре названий разных задач, ни в отнесении их к аналитическим либо синтетическим [1–9].

Чаще всего задачи интеллектуальной деятельности обсуждаются при отсутствии их формальных постановок [1–12]. Обычно даётся только описание задач - характерные особенности, отличающие их от других задач. При этом даже наиболее «распространённые» задачи описываются по-разному. Более того, описываются перечисляемые задачи в разных терминах, что затрудняет понимание и сравнение их содержания [1–14]. Изредка встречающиеся постановки задач обычно недостаточно формальны, представлены в содержательных терминах, часто ориентированных на отдельные предметные области [11–14]. Это затрудняет проведение системного анализа для автоматизации произвольной интеллектуальной деятельности, где обычно стремятся выделить отдельные подзадачи, постановки которых известны. Поэтому целью работы является введение единой формальной системы обозначений для постановок задач разного уровня абстракции и разработка формальных постановок практически полезных задач на абстрактном уровне и на уровне уточнения свойств предметных областей (ПрО), в которых такие задачи появляются.

1. Постановки задач интеллектуальной деятельности

В работах обычно отсутствуют формальные *постановки задач* (точные формулировки условий задач с описанием входной и выходной информации); однако имеются отдельные работы, в которых описывается, что в задаче дано, и что нужно найти.

Постановка задачи поиска плана действий (применительно к интегральным роботам) [14] заключается в следующем.

Дано: начальная ситуация (объект, состояние); конечная, или целевая, ситуация (объект, состояние); множество операторов, преобразующих одну ситуацию в другую.

Найти: такую последовательность операторов, которая преобразует начальную ситуацию в конечную.

Примеры постановок трёх задач приводятся в [11].

Постановка задачи диагностики

Дано: ситуация ненормального функционирования; необычные проявления; стандартный набор диагностических тестов.

Найти: известные категории болезней, объясняющие причины признаков, и рекомендуемые методы лечения.

Постановка задачи проектирования

Дано: спецификация проектируемого объекта или системы; стандартные аналитические тесты на систему и компоненты; возможные компоненты, их свойства и взаимосвязи между ними.

Найти: объект или систему, которая удовлетворяет этой спецификации.

Постановка задачи планирования

Дано: спецификация достигаемого результата; отдельные действия.

Найти: план, который достигает результат, удовлетворяющий этой спецификации.

Постановка задачи медицинской диагностики [15]

Дано: медицинские знания о наблюдениях, их нормальных значениях; знания о причинно-следственных связях между заболеваниями и наблюдениями, между событиями и наблюдениями, между событиями и заболеваниями; а также значения наблюдавшихся анатомо-физиологических особенностей больного, значения наблюдавшихся признаков, произошедшие с больным события (для краткости далее называемые *результатами наблюдений* больного).

Найти: диагноз пациента, указать причину каждого заболевания (этиологию или осложнение) и объяснить все полученные значения наблюдений.

Постановка задачи поиска знаний (для фиксированной модели зависимости между значениями признаков объектов и их классами).

Дано: обучающая выборка (конечное множество объектов, каждый из которых задан значениями признаков и классом, которому он принадлежит).

Найти: решающее правило, которое объекту, заданному значениями признаков, правильно сопоставляет класс, которому этот объект принадлежит [16].

Наличие таких постановок позволяет видеть различие и общие черты разных задач.

2. Математические абстракции используемых терминов

Введём математические абстракции для основных терминов, используемых в инженерии знаний, опираясь на аппарат алгебраических систем [17].

Математической абстракцией понятия *терминология* PrO будем считать многосортную сигнатуру $\Sigma = \{O, F, Pr\}$, где:

O — множество предметных символов, для каждого из которых указан сорт его возможных значений (термины, денотатами которых являются значения);

F — множество функциональных символов, для каждого из которых указаны сорта аргументов и значения функции (термины, денотатами которых являются функциональные соответствия);

Pr — множество предикатных символов, для каждого из которых указаны сорта аргументов предиката (термины, денотатами которых являются отношения).

Примечание. Функции и отношения, являющиеся интерпретациями (денотатами) функциональных и предикатных символов, могут зависеть от времени, координат пространства и других характеристик.

Математической абстракцией понятия *онтология ПрО* будем считать пару $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$, состоящую из сигнатуры Σ и множества предложений (аксиом) A_Σ на логическом языке сигнатуры Σ , представляющих те свойства терминов онтологии, которые определяются соглашениями.

Математической абстракцией понятия *база знаний, согласованная с онтологией* (БЗ), будем считать непустое множество предложений KB_Σ на логическом языке сигнатуры Σ , представляющих те свойства ПрО, которые получены путём индукции или дедукции, при условии, что множество $A_\Sigma \cup KB_\Sigma$ непротиворечиво и никакое предложение из KB_Σ не является логическим следствием предложений из A_Σ . KB_Σ может содержать в том числе и знания эксперта ПрО.

Математической абстракцией понятия *ситуация ПрО, согласованная с онтологией*, будем считать алгебраическую систему (АС) AS_Σ сигнатуры Σ , относительно которой все предложения из множества A_Σ истинны. Примером ситуации может быть и некоторая система как «множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определённую целостность» [18].

Обозначим R_Σ подмножество предметных символов $O_1 \subseteq O$ сигнатуры Σ вместе с их значениями (интерпретациями), и подмножества функциональных символов $F_1 \subseteq F$ и предикатных символов $Pr_1 \subseteq Pr$, для которых заданы их частичные (возможно, не на всей области их определения) интерпретации.

R_Σ есть математическая абстракция результатов наблюдения признаков, характеристик системы и произошедших событий.

Обозначим $AS_\Sigma(R_\Sigma)$ такую алгебраическую систему сигнатуры Σ , что предметные символы из O_1 имеют в $AS_\Sigma(R_\Sigma)$ такую же интерпретацию, что и в R_Σ , а интерпретация функциональных символов из F_1 и предикатных из Pr_1 в $AS_\Sigma(R_\Sigma)$ является расширением их интерпретации в R_Σ , и относительно которой все предложения из множества A_Σ их интерпретации в R_Σ , и относительно которой все предложения из множества A_Σ истинны.

Будем считать R_Σ математической абстракцией *результатов наблюдения ситуации*, согласованных с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$, если существует АС AS_Σ ; при этом АС $AS_\Sigma(R_\Sigma)$ может рассматриваться в качестве математической абстракции объяснения результатов наблюдения ситуации, согласованного с онтологией.

Математической абстракцией условий, которым должен удовлетворять результат решения задачи, (сокр. - *условий на результат решения задачи*), согласованных с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$ и обозначаемых далее C_Σ , является множество предложений на логическом языке сигнатуры Σ такое, что множество предложений $A_\Sigma \cup C_\Sigma$ непротиворечиво.

Математической абстракцией запроса дополнительной информации, обозначаемого Q_Σ , для результатов наблюдения R_Σ , согласованных с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$, является либо предметный символ $o \in O \setminus O_1$; либо терм $f(c_1, \dots, c_k)$, где c_1, \dots, c_k — константы, а f — функциональный символ сигнатуры Σ , причём если $f \in F_1$, то $\langle c_1, \dots, c_k \rangle$ не принадлежит частичной области определения символа f , заданной в R_Σ ; либо формула $p(c_1, \dots, c_k)$, где c_1, \dots, c_k — константы, а p — предикатный сим-

вол сигнатуры Σ , причём если $p \in Pr_1$, то $\langle c_1, \dots, c_k \rangle$ не принадлежит частичной области определения символа p , заданной в R_Σ .

Математической абстракцией ответа на запрос Q_Σ , обозначаемый далее AQ_Σ , является либо значение предметного символа o , либо значение терма $f(c_1, \dots, c_k)$, либо значение формулы $p(c_1, \dots, c_k)$ такие, что существует такая АС $AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, AQ_\Sigma \rangle)$, что ни одно из предложений A_Σ не является ложным относительно $AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, AQ_\Sigma \rangle)$.

Множества функциональных и предикатных символов сигнатуры Σ , зависящих от времени, будем обозначать F_t и Pr_t . Пусть $\{rt1, \dots, rtm\}$ - подмножество символов из $F_t \cup Pr_t$, для которых заданы их интерпретации в некоторые моменты времени.

Функциональный терм (атомную формулу) с таким символом ($r_{tj} \in F_t \cup Pr_t$), одним из аргументов которого является момент t , обозначим через $r_{tj}(\dots, t, \dots)$. Функциональные термы (атомные формулы) символа r_{tj} , аргумент которых, соответствующий моментам времени, имеет значения t_0, \dots, t_k , обозначим через $\{r_{tj}(\dots, t_0, \dots), \dots, r_{tj}(\dots, t_k, \dots)\}$. Если функциональные термы $r_{t1}(\dots, t_0, \dots), \dots, r_{t1}(\dots, t_k, \dots), r_{tm}(\dots, t_0, \dots), \dots, r_{tm}(\dots, t_k, \dots)$ вместе с их значениями входят в R_Σ , то в этом случае вместо R_Σ будем использовать обозначение $R_\Sigma(t_0, \dots, t_k)$.

Функциональный терм символа q' с аргументом t' , соответствующим моменту времени, (в который значение терма или формулы неизвестно) обозначим через $q'(\dots, t', \dots)$.

Обозначим D множество *действий*, которые можно выполнять над системой. Выполнение действия изменяет текущее состояние системы, вызывая тем самым переход её в новое *состояние*. Обозначим S — множество возможных *состояний* системы, над которой выполняются *действия* из D .

Действие $d \in D$ есть функция, отображающая S в S . Каждое действие характеризуется *предусловием* (условием на состояние, в котором его можно применять) и *постусловием* (условием на состояние, возникающее после выполнения действия).

Обозначим $\varphi_{pred}^j(s)$ предусловие для действия d^j , а $\varphi_{post}^j(s)$ — постусловие для него (аргумент s обозначает состояние, в котором вычисляется значение формулы).

Обозначим R_O — значения предметных символов из O (результат наблюдения характеристик системы).

3. Задачи индукции и дедукции

Будем называть задачей интеллектуальной деятельности задачу, в постановке которой в качестве входных данных и/или результатов присутствуют согласованные с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$ БЗ KB_Σ и АС AS_Σ . Рассмотрим разные классы задач интеллектуальной деятельности, называемые далее для краткости просто задачами. В зависимости от того, требуется ли найти БЗ или она задана, можно различать задачи индукции и дедукции.

В **задаче индукции** по обучающей выборке (заданному множеству задач с известными решениями) требуется сформировать такую БЗ, относительно которой все задачи обучающей выборки решаются правильно.

Дано: множество AS_Σ АС, согласованных с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$.

Найти: KB_Σ , согласованную с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$ такую, что относительно каждой АС из AS_Σ все предложения из KB_Σ истинны.

Комментарий: AS_Σ является математической абстракцией множества задач с известными решениями, т.е. абстракцией обучающей выборки.

Среди задач дедукции выделим задачи поиска гипотез и критики гипотезы.

В **задаче поиска гипотез** требуется найти все гипотезы, соответствующие БЗ.

Дано: KB_Σ , согласованная с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$.

Найти: все АС сигнатуры Σ , удовлетворяющие условию: все предложения из множества $A_\Sigma \cup KB_\Sigma$ являются истинными относительно каждой из этих АС.

Комментарий: искомые АС являются математической абстракцией гипотез.

В **задаче критики гипотезы** требуется проверить соответствие заданной гипотезы БЗ.

Дано: AS_Σ, KB_Σ , согласованные с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$.

Найти: те предложения из множества KB_Σ , которые ложны относительно заданной AS_Σ (или показать, что таких предложений нет).

4. Задачи анализа результатов наблюдений и анализа условий на решения

В зависимости от того, заданы ли в качестве входных данных результаты наблюдения ситуации R_Σ или условия на решение задачи C_Σ , можно различать *задачи анализа результатов наблюдений* и *задачи анализа условий на решения*.

Рассмотренные выше задачи индукции и дедукции являются слишком абстрактными и поэтому мало реалистичными. Более полезным является подмножество декартова произведения этих двух множеств задач, которое приводит к следующим группам задач (с учетом того, что на практике задачу поиска БЗ по обучающей выборке ситуаций, представленных условиями на решения, обычно не рассматривают).

Задача поиска БЗ по обучающей выборке ситуаций, представленных результатами наблюдений рассматривается как комбинация *задачи индукции* и *задачи анализа результатов наблюдений*, в которой каждый элемент обучающей выборки представляет собой результаты наблюдения некоторой ситуации: по такой обучающей выборке требуется сформировать такую БЗ, согласованную с онтологией, что по каждому элементу обучающей выборки может быть построена модель ситуации, согласованная с онтологией, результатами наблюдений и БЗ.

Дано: обучающая выборка $\{R_\Sigma\}$ (множество элементов, каждый из которых представлен результатами наблюдений некоторой ситуации, согласованными с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$).

Найти: KB_Σ , согласованную с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$, такую, что для каждого элемента R_Σ обучающей выборки существует АС $AS_\Sigma(R_\Sigma)$, относительно которой все предложения из KB_Σ истинны.

Задача поиска гипотез, объясняющих результаты наблюдений рассматривается как комбинация *задачи поиска гипотез* и *задачи анализа результатов наблюдений*, в которой кроме БЗ заданы и результаты наблюдений ситуации: требуется найти все гипотезы, соответствующие результатам наблюдений и БЗ.

Дано: KB_Σ , согласованная с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$;

R_Σ , согласованное с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$.

Найти: все такие АС $AS_\Sigma (R_\Sigma)$, что все предложения из множества $A_\Sigma \cup KB_\Sigma$ являются истинными относительно каждой из этих АС.

Комментарий: в этой постановке искомые $AS_\Sigma (R_\Sigma)$ являются математической абстракцией объяснений результатов наблюдения ситуации, согласованных с БЗ.

Задача проектирования рассматривается как комбинация *задачи поиска гипотез* и *задачи анализа условий на решение*, в которой кроме базы знаний, задано непустое множество условий на результат решения задачи: требуется найти все проекты, соответствующие БЗ и условиям на решение задачи.

Дано: KB_Σ , согласованная с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$;

C_Σ (непустое),

при условии: $A_\Sigma \cup KB_\Sigma \cup C_\Sigma$ непротиворечиво.

Найти: все такие $\{AS_\Sigma\}$, относительно которых все предложения из $A_\Sigma \cup KB_\Sigma \cup C_\Sigma$ являются истинными.

Комментарий: AS_Σ является математической абстракцией проекта.

Задача критики объяснения результатов наблюдений рассматривается как комбинация *задачи критики гипотезы* и *задачи анализа результатов наблюдений*, в которой кроме базы знаний даны результаты наблюдения ситуации и их объяснение: требуется установить несоответствие объяснения результатов наблюдения БЗ или подтвердить их соответствие.

Дано: KB_Σ , согласованная с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$;

R_Σ , согласованное с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$;

$AS_\Sigma (R_\Sigma)$, согласованная с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$.

Найти: те предложения из множества KB_Σ , которые ложны относительно $AS_\Sigma (R_\Sigma)$, или показать, что таких предложений нет.

Комментарий: $AS_\Sigma (R_\Sigma)$ является математической абстракцией объяснения результатов наблюдения R_Σ .

Задача критики проекта рассматривается как комбинация *задачи критики гипотезы* и *задачи анализа условий на решение*, в которой требуется проверить соответствие проекта БЗ и условиям, которым он должен удовлетворять.

Дано: KB_Σ , согласованная с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$;

C_Σ , согласованное с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$;

AS_Σ ,

при условии: множество предложений $A_\Sigma \cup KB_\Sigma \cup C_\Sigma$ непротиворечиво.

Найти: те предложения из множества $KB_\Sigma \cup C_\Sigma$, которые ложны относительно заданной AS_Σ (или показать, что таких предложений нет).

Комментарий: AS_{Σ} является математической абстракцией критикуемого проекта.

5. Задачи, связанные с классификацией

Во многих ПрО существуют классификации ситуаций и решаются задачи, учитывающие эти классификации. В таких задачах в сигнатуру Σ входит предметный символ «класс», область возможных значений которого состоит из конечного множества значений $\{\text{класс}_1, \dots, \text{класс}_i, \dots, \text{класс}_n\}$, а в БЗ KB_{Σ} входят предложения о свойствах ситуаций каждого класса.

Поставленные выше группы задач имеют свои уточнения; возникает также новая задача, учитывающая классификацию ситуаций.

Задача формирования знаний о классах по обучающей выборке ситуаций, представленных результатами наблюдений рассматривается как уточнение задачи поиска БЗ по обучающей выборке ситуаций, представленных результатами наблюдений, в которой элементами обучающей выборки являются не только результаты наблюдения различных ситуаций, но и класс, к которому относится каждая ситуация.

Дано: обучающая выборка $\{\langle R_{\Sigma}, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle\}$, каждый из элементов которой представлен парой, состоящей из результатов наблюдений некоторой ситуации и значением класс_i предметного символа «класс» для этой ситуации.

Найти: KB_{Σ} , такую, что для каждого элемента обучающей выборки $\langle R_{\Sigma}, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle$ существует $AS_{\Sigma}(\langle R_{\Sigma}, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle)$, относительно которой все предложения из KB_{Σ} истинны.

Комментарий: $\{\langle R_{\Sigma}, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle\}$ является математической абстракцией множества правильно классифицированных ситуаций, заданных результатами наблюдений, $AS_{\Sigma}(\langle R_{\Sigma}, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle)$ является математической абстракцией объяснения классификации ситуации, заданной результатами наблюдений, KB_{Σ} является математической абстракцией БЗ, содержащей описания свойств классов.

Задача распознавания рассматривается как уточнение задачи поиска гипотез, объясняющих результаты наблюдений, в которой требуется найти все гипотезы о классе ситуации, описанной результатами наблюдений.

Дано: KB_{Σ} ,

R_{Σ} , согласованное с $\langle \Sigma, A_{\Sigma} \rangle$.

Найти: множество $H_{R,KB,\Sigma} = \{\text{класс}_{i1}, \dots, \text{класс}_{im}\}$, состоящее из всех таких значений предметной переменной «класс», что существуют АС $AS_{\Sigma}(\langle R_{\Sigma}, \text{класс} = \text{класс}_{i1} \rangle), \dots, AS_{\Sigma}(\langle R_{\Sigma}, \text{класс} = \text{класс}_{im} \rangle)$, относительно каждой из которых все предложения из множества $A_{\Sigma} \cup KB_{\Sigma}$ являются истинными.

Комментарий: АС $\{AS_{\Sigma}(\langle R_{\Sigma}, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle)\}$ являются математическими абстракциями объяснения различных классификаций одних и тех же результатов наблюдений.

Будем говорить, что БЗ KB_Σ удовлетворяет условию делимости классов, если для любой пары $\langle R_\Sigma, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle$, для которой существует такая АС $AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle)$, что все предложения из KB_Σ истинны, в KB_Σ существуют ложные предложения относительно любой АС $AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, \text{класс} = \text{класс}_j \rangle)$ и всех $j \neq i$.

Задача запроса дополнительной информации для распознавания рассматривается по аналогии с последовательным статистическим анализом. В ней по результатам наблюдений ситуации, для которых существует более одной гипотезы о классе, требуется предложить дополнительное наблюдение ситуации, которое гарантированно позволит сократить множество гипотез.

Дано:

KB_Σ , удовлетворяющая условию делимости классов,

R_Σ , такое, что для него множество $H_{R,KB,\Sigma}$ имеет мощность не меньше двух.

Найти: такой запрос Q_Σ дополнительной информации для результатов R_Σ , согласованных с онтологией $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$, что если R'_Σ есть R_Σ , объединенное с AQ_Σ , то множество $H_{R',KB,\Sigma}$ имеет меньшую мощность, чем множество $H_{R,KB,\Sigma}$.

Комментарий: множество $H_{R,KB,\Sigma}$ является математической абстракцией множества гипотез о классе ситуации, полученных на основе БЗ KB_Σ и результатов наблюдений R_Σ , а множество $H_{R',KB,\Sigma}$ является математической абстракцией множества гипотез о классе ситуации, полученных на основе БЗ KB_Σ и результатов наблюдений R_Σ , дополненных результатами ответа AQ_Σ на запрос Q_Σ дополнительной информации.

Задача проектирования систем заданного класса является уточнением задачи проектирования. В ней требуется по БЗ и множеству условий на результат решения найти проект системы заданного класса.

Дано: KB_Σ ,

значение класс_i предметного символа «класс»,

C_Σ .

Найти: все такие $\{AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, \text{класс} = \text{класс}_m \rangle)\}$, относительно которых все предложения из $A_\Sigma \cup KB_\Sigma \cup C_\Sigma$ являются истинными.

Комментарий: найденные $\{AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, \text{класс} = \text{класс}_m \rangle)\}$ являются математической абстракцией множества проектов заданного класса класс_i .

Задача критики гипотезы о классе рассматривается как уточнение задачи критики объяснения результатов наблюдений. В ней требуется проверить соответствие заданной гипотезы о принадлежности ситуации заданному классу БЗ.

Дано: KB_Σ и R_Σ , согласованные с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$;

значение класс_i предметного символа «класс»,

$AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle)$.

Найти: те предложения из множества KB_Σ , которые ложны относительно $AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle)$, или показать, что таких предложений нет.

Комментарий: $AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle)$ является математической абстракцией объяснения принадлежности результатов наблюдения R_Σ классу класс_i .

Задача критики проекта заданного класса рассматривается как уточнение задачи критики проекта, в которой задан класс проектируемой системы.

Дано: KB_Σ ,

C_Σ , согласованные с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$,

значение *класс_i* предметного символа «класс»,

АС $AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle)$.

Найти те предложения из множества $KB_\Sigma \cup C_\Sigma$, которые ложны относительно заданной $AS_\Sigma(\langle R_\Sigma, \text{класс} = \text{класс}_i \rangle)$, или показать, что таких предложений нет.

6. Задачи, в которых существенную роль играет время

Некоторые задачи связаны с онтологиями, которые обязательно содержат термины, денотаты которых являются функциональными соответствиями и отношениями, зависящими от времени. В таких задачах в сигнатуру Σ входят функциональные и предикатные символы, зависящие от времени (эти символы являются математической абстракцией атрибутов динамической системы или ситуации, зависящих от времени, одним из которых часто является состояние). В постановках задач анализа результатов наблюдений R_Σ содержит кортежи значений таких символов, и в $A_\Sigma, KB_\Sigma, C_\Sigma$ присутствуют предложения, использующие такие символы.

Постановки задач поиска гипотез, объясняющих результаты наблюдений, критики объяснения результатов наблюдений и др. для динамической ситуации не меняются, но уточняются за счёт того, что интерпретация некоторых символов зависит от времени. В ПрО, различающих классы ситуаций, значения которых зависят от времени, такими уточняющими задачами становятся задача распознавания класса ситуации, описанной результатами динамических наблюдений, и задача запроса дополнительной информации для распознавания класса динамической ситуации.

Задачи проектирования (и критики проекта) могут ставиться для динамических систем (а не только для статических систем). Среди символов сигнатуры для проектов динамических систем должны быть функциональные и/или предикатные символы, которые зависят от времени. Эти символы используются при описании динамических свойств компонентов в БЗ KB_Σ и при задании условий C_Σ на конкретную проектируемую систему. Таким образом, в задачах проектирования динамической системы в C_Σ присутствуют формулы, отражающие динамические свойства системы. Кроме уточнённых задач для динамических систем возникают и новые задачи.

Задача прогноза — уточнение задачи поиска гипотез, объясняющих результаты наблюдений, в которой по значениям функциональных термов (атомных формул), зависящих от времени, заданным в некоторые моменты времени t_0, \dots, t_k (обычно — по результатам наблюдений за динамической системой) требуется определить значения этого или другого функционального терма (атомной формулы)

для заданного момента времени t' , отличного от t_0, \dots, t_k (чаще — для будущего момента) при заданных значениях остальных аргументов (если они есть).

Дано: KB_Σ , согласованная с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$,

упорядоченное множество моментов времени $\{t_0, \dots, t_k\}$;

$R_\Sigma(t_0, \dots, t_k)$;

$t' \notin \{t_0, \dots, t_k\}$;

$q' \in Ft \cup Pr_t$.

Найти: все такие значения функционального термина (атомной формулы) $q'(\dots, t', \dots)$, для каждого из которых существует такая АС $AS_\Sigma (\langle R_\Sigma(t_0, \dots, t_k), q'(\dots, t', \dots) \rangle)$, что все предложения из KB_Σ истинны относительно неё.

Комментарий: если $t' > t_k$, то речь идёт о прогнозе на будущее; если же $t' < t_k$, то речь идет о «ретроспективном» прогнозе.

Если в ПрО динамике рассматриваемых ситуаций соответствует конечное множество состояний $\{\text{состояние}_1, \dots, \text{состояние}_i, \dots, \text{состояние}_n\}$, то функциональный символ «состояние», зависящий от времени, начинает «играть роль» предметного символа «класс». При этом частным случаем *задачи прогноза* становится *задача прогноза состояния динамической системы*; в ней требуется найти значение функционального символа «состояние» в интересующий момент времени.

Наряду с *задачей распознавания состояния системы*, которая может быть рассмотрена для динамической системы, имеет место *задача распознавания* в реальном времени такого *момента*, когда ситуация требует принятия некоторых мер. Такое состояние системы иногда называют «критическим», отличным от нейтрального, а задачу распознавания такого состояния — *задачей мониторинга*. В этом случае в сигнатуру должен входить некоторый выделенный предикатный символ *критическое состояние*.

В задаче мониторинга требуется по результатам наблюдения динамической системы определить, является ли состояние системы критическим.

Дано: KB_Σ , согласованная с $\langle \Sigma, A_\Sigma \rangle$,

упорядоченное множество моментов времени $\{t_0, \dots, t_k\}$;

$R_\Sigma(t_0, \dots, t_k)$;

Найти: такое значение атомной формулы *критическое состояние*(t_k), для которого существует такая АС $AS_\Sigma (\langle R_\Sigma(t_0, \dots, t_k), \text{критическое состояние}(t_k) \rangle)$, что все предложения из KB_Σ истинны относительно неё.

Для динамической системы уточнением задачи поиска БЗ по обучающей выборке ситуаций, представленных результатами наблюдений является задача поиска БЗ по обучающей выборке ситуаций, представленных результатами наблюдений динамической системы, постановка которой получается заменой R_Σ на $R_\Sigma(t_0, \dots, t_k)$.

7. Задачи, связанные с планированием действий

Во многих ПрО решаются задачи, рассматривающие действия (упорядоченные хотя бы частично), приводящие к некоторой заданной цели. В таких задачах в

сигнатуру Σ входят символы для обозначения *действий* (из конечного множества названий действий в рамках ПрО).

В БЗ каждое действие d^j представлено парой $\langle \varphi_{pred}^j, \varphi_{post}^j \rangle$.

План связывает *действия с состояниями*, начиная от *начального* и завершая *целевым* (конечным) состоянием. При планировании «с классическими допущениями», когда мир полностью наблюдаем и статичен, а действия детерминированы, дискретны и недопустимо их параллельное исполнение, (линейный) план представляет собой последовательность действий, которая позволяет достичь цели из начального состояния [14].

Будем называть *линейным планом* кортеж $\langle s_0, d^1, d^2, \dots, d^{(n-1)}, d^n \rangle$, для которого существует такой кортеж состояний $\langle s_0, s_1, s_2, \dots, s_{(n-1)}, s_n \rangle$ и АС $AS_{\Sigma}(\langle s_0, s_1, s_2, \dots, s_{(n-1)}, s_n \rangle)$, относительно которой справедливы предложения: $\varphi_{pred}^1(s_0)$, $\varphi_{post}^1(s_1)$, $\varphi_{pred}^2(s_1)$, $\varphi_{post}^2(s_2)$, ..., $\varphi_{pred}^n(s_{n-1})$, $\varphi_{post}^n(s_n)$.

Кортеж $\langle s_0, d^1, d^2, \dots, d^{(n-1)}, d^n \rangle$ является математической абстракцией последовательности действий, ведущих к переходу через множество состояний, начиная от начального и завершая целевым (конечным) состоянием.

В задаче линейного планирования требуется определить множество линейных планов, выполнение которых приводит к достижению *целевого состояния*, удовлетворяющего заданному *условию*, начиная от заданного *начального состояния*. *Задача планирования* — расширение задачи проектирования, точнее — *проектирования систем заданного класса* (класса «последовательность действий»).

Дано: $D \subseteq F$;

$\{ \langle \varphi_{pred}^j(s) \Rightarrow \varphi_{post}^j(d_j(s)) \rangle \mid d_j \in D \} \subseteq KB_{\Sigma}$,

$s_0 \in S$;

$\varphi_{fin}(s) \subseteq C_{\Sigma}$.

Найти: линейный план $\langle s_0, d^1, d^2, \dots, d^{(n-1)}, d^n \rangle$, для которого существует АС $AS_{\Sigma}(\langle s_0, s_1, s_2, \dots, s_{(n-1)}, s_n \rangle)$, относительно которой справедливы все предложения из KB_{Σ} , предложение $\varphi_{fin}(s)$, а также все другие предложения из C_{Σ} .

Постановка задачи планирования усложняется в случае невыполнения «классических допущений». Будем называть *планом с параллельным выполнением действий* ориентированный граф G , метками вершин которого являются состояния из множества S , а метками дуг — действия из множества D . У графа G одна начальная вершина, в которую не входит ни одной дуги, одна конечная вершина, из которой не выходит ни одной дуги, и любая вершина этого графа лежит на некотором пути из начальной вершины в конечную. Для графа G существует АС $AS_{\Sigma}(\langle G \rangle)$, относительно которой выполнены утверждения: если в этом графе из вершины с меткой s выходят дуги с метками d^1, \dots, d^n , то справедливы предложения $\varphi_{pred}^1(s)$, $\varphi_{pred}^2(s)$, $\varphi_{pred}^n(s)$, если в этом графе из вершины с меткой s_1 выходит дуга с меткой d^1 , входящая в вершину с меткой s_2 , то справедливы предложения $\varphi_{pred}^d(s_1)$, $\varphi_{post}^d(s_2)$, а если в этом графе в вершину с меткой s входят дуги с метками d^1, \dots, d^n , то справедливы предложения $\varphi_{post}^1(s)$, $\varphi_{post}^2(s)$, $\varphi_{post}^n(s)$.

Задачи планирования с параллельным выполнением действий

Дано: $D \subseteq F$;

$\{\langle \varphi_{pred}^j(s) \Rightarrow \varphi_{post}^j(d_j(s)) \rangle \mid d_j \in D\} \subseteq KB_\Sigma$,

$s_0 \in S$;

$\varphi_{fin}(s) \subseteq C_\Sigma$.

Найти: план с параллельным выполнением действий G , у которого начальная вершина имеет метку s_0 и для которого существует АС $AS_\Sigma(\langle G \rangle)$, относительно которой справедливы все предложения из KB_Σ и если конечная вершина имеет метку s_n , то справедливо предложение $\varphi_{fin}(s_n)$, а также все другие предложения из C_Σ .

В ПрО, рассматривающих планирование, также уточняется и *задача критики плана*.

8. Группа задач, связанных с причинно-следственными отношениями

В ряде ПрО решаются задачи для систем, в которых во времени протекают процессы, связанные между собой посредством причинно-следственных отношений. Процессы, протекающие в такой системе, условно можно разделить на внешние (*наблюдаемые*) и *внутренние* (те, которые не могут наблюдаться непосредственно и о которых можно судить лишь по их связям с наблюдаемыми процессами). Наблюдаемые процессы обычно называют *признаками*, признаки имеют значения, которые получаются в результате наблюдения этих признаков и изменяются с течением времени. Помимо признаков наблюдаемыми могут быть постоянные во времени *характеристики* системы и происходящие в различные моменты времени события, внешние по отношению к системе, но воздействующие на протекающие в ней процессы (как внешние, так и внутренние) [19].

Причинно-следственные отношения между множеством причин и множеством следствий включают в себя:

- отношения между внутренними и внешними процессами (причинами являются внутренние процессы, а следствиями — признаки);
- отношения между внутренними процессами (причинами являются внутренние процессы, а следствиями — другие внутренние процессы);
- отношения между событиями и внешними процессами (причинами являются события, а следствиями — признаки);
- отношения между событиями и внутренними процессами (причинами являются события, а следствиями — внутренние процессы);
- смешанные отношения (причинами являются внутренние процессы и события, а следствиями — признаки) [19].

Сигнатура Σ содержит:

- для каждого внутреннего процесса — функциональный символ, зависящий от времени, значение которого есть состояние процесса (обозначим множество всех таких функциональных символов F_{in});
- для каждого внешнего процесса — функциональный символ, зависящий от времени, значение которого есть значение признака (обозначим множество всех

таких функциональных символов F_{ex});

– для каждой характеристики системы — предметный символ, значение которого есть значение характеристики системы;

– для каждого события — функциональный символ, зависящий от времени (с дискретной областью определения), значение которого есть характеристики произошедшего в некоторый момент события (обозначим множество всех таких функциональных символов F_{ev});

– для каждого причинно-следственного отношения — предикатный символ, зависящий от времени, остальными аргументами которого являются *причины, воздействующие факторы* и *следствия*, представленные обозначаемыми их символами сигнатуры (обозначим множество всех таких предикатных символов P_c).

В БЗ KB_Σ каждому причинно-следственному отношению соответствует предложение вида $\forall tp_c(\dots, t) \Rightarrow \varphi(\dots, t)$, где $p_c \in P_c$, а $\varphi(\dots, t)$ — формула (причинная закономерность), устанавливающая соответствие между значениями причин, характеристик системы и значениями следствий этого отношения (аргументов отношения p_c) на некотором интервале времени от начала действия причин и до окончания их действия.

Часть внутренних процессов, протекающих в системе, является присущей системе. Они протекают в ней постоянно и определены на всем временном интервале существования системы. Некоторые внешние процессы (параметры) тоже являются присущими системе и протекают в ней постоянно; другие внешние процессы (симптомы) не являются присущими системе и могут протекать в ней только на некоторых интервалах времени. Система функционирует нормально до тех пор, пока в ней протекают только присущие ей внутренние процессы, а происходящие события не приводят к возникновению в ней новых внутренних процессов, не присущих ей. Каждый процесс (внешний и внутренний), не являющийся присущим системе, имеет начало (момент времени, когда он возникает) и конец (момент времени, когда он исчезает).

Пусть AS_Σ — алгебраическая система сигнатуры Σ , являющаяся моделью некоторой конкретной системы (ситуации). Символы сигнатуры Σ имеют в ней следующие интерпретации:

– функциональный символ $f_{ex} \in F_{ex}$, обозначающий признак, — функцию, областью определения которой является для параметров вся временная ось, а для симптомов — некоторый интервал времени, а областью значений — возможные значения признака;

– функциональный символ $f_{ev} \in F_{ev}$, обозначающий событие, — функцию, областью определения которой является некоторое дискретное множество моментов времени, а областью значений — возможные значения события;

– функциональный символ $f_{in} \in F_{in}$, обозначающий внутренний процесс, — функцию, областью определения которой является для процессов, присущих системе, вся временная ось, а для процессов, не присущих системе, — некоторый интервал времени, а областью значений — возможные состояния процесса;

– предметный символ $o \in O$, обозначающий характеристику системы, — одно из значений этой характеристики;

– предикатный символ $p_c \in P_c$ — множество (возможно пустое) таких кортежей

отношения (причинных связей), элементами которых являются аргументы этого отношения, для которых причинная закономерность этого отношения является истинной относительно AS_Σ .

Назовём причинно-следственной моделью AS_Σ системы такую алгебраическую систему сигнатуры Σ , что выполнены следующие условия:

- для каждого признака существует причинная связь, в которой этот признак является следствием;
- для каждого события существует причинная связь, в которой это событие является причиной;
- для каждого внутреннего процесса, не присущего системе, существует причинная связь, в которой этот процесс является следствием, и существует причинная связь, в которой этот процесс является причиной;
- для каждого внутреннего процесса, присущего системе, существует причинная связь, в которой этот процесс является причиной;
- все предложения из БЗ являются истинными относительно AS_Σ .

Следующие задачи учитывают процессы, связанные между собой посредством причинно-следственных отношений.

В задаче диагностики требуется по результатам наблюдения признаков, характеристик системы и произошедших событий определить возможные причинно-следственные модели системы. При этом диагнозом называется совокупность внутренних процессов этой модели, не являющихся присущими системе.

Дано: R_Σ (результаты наблюдения признаков, характеристик системы и произошедших событий);

KB_Σ ;

Найти: все возможные причинно-следственные модели $AS_\Sigma(R_\Sigma)$ системы, согласованные с результатами наблюдений R_Σ , относительно которых все предложения из БЗ KB_Σ истинны (математические абстракции объяснения возможных диагнозов). При этом диагнозом Δ в каждой такой модели является множество функциональных символов из $F_{in}(\Delta \subseteq F_{in})$, обозначающих внутренние процессы, не присущие системе, интерпретация каждого из которых в $AS_\Sigma(R_\Sigma)$ имеет непустую область определения.

Обозначим R_{ev} интерпретации функциональных символов из F_{ev} (планируемые события); $AS_\Sigma(R_0, \Delta, R_{ev})$ — алгебраическую систему сигнатуры Σ , в которой интерпретация предметных символов из O есть R_0 , интерпретации функциональных символов из Δ имеют непустые области определения, а интерпретации функциональных символов из F_{ev} есть R_{ev} .

В задаче прогноза результата воздействий требуется, зная характеристики системы, диагноз и планируемые события, определить значения признаков в некоторые моменты времени в таких причинно-следственных моделях системы, которые соответствуют БЗ.

Дано: R_0 (результат наблюдения характеристик системы);

Δ (диагноз);

R_{ev} (планируемые события);

T (конечное множество моментов времени);

KB_{Σ} .

Найти: в каждой причинно-следственной модели $AS_{\Sigma}(R_0, \Delta, R_{ev})$, относительно которой все предложения из БЗ KB_{Σ} истинны, значения всех функций, являющихся интерпретациями функциональных символов из F_{ex} , во все моменты времени из множества T .

Обозначим $cond(f_{ex}, t)$ формулу, являющуюся условием на значение признака $f_{ex} \in F_{ex}$ в момент времени t , а множество таких формул — $Cond \subseteq C_{\Sigma}$.

В задаче планирования управления требуется, зная характеристики системы, диагноз и условия на значения признаков, определить такую совокупность событий и соответствующие им моменты времени, при которых признаки как функции времени в причинно-следственных моделях системы, соответствующих БЗ, будут удовлетворять этим условиям.

Дано: R_O (результат наблюдения характеристик системы);

Δ (диагноз);

$Cond$ (условия на значения признаков),

KB_{Σ} .

Найти: R_{ev} (совокупность событий и моментов времени), при которых признаки как функции времени в причинно-следственных моделях системы, соответствующих БЗ, будут удовлетворять этим условиям.

Задача *критики гипотезы о диагнозе* может рассматриваться как уточнение задачи *критики гипотезы о классе*, (поскольку множество возможных диагнозов может рассматриваться как своего рода класс). Аналогично сказанному задача *запроса дополнительной информации для диагностики* может рассматриваться как уточнение задачи *запроса дополнительной информации для распознавания*.

9. Заключение

Автоматизация повседневной интеллектуальной деятельности и управления её качеством требует детальной разработки всех тех этапов, от которых зависит решение проблемы поддержки интеллектуальной деятельности и правильности применения знаний при этом. Первый из них - этап системного анализа, где обсуждаются требующие поддержки интеллектуальные и другие задачи, решаемые специалистами, строится схема связи этих задач [20]. При этом среди интеллектуальных задач стремятся выявить те, постановки которых известны (или выделить в них подзадачи, постановки которых известны).

Поставленные в единой формальной системе обозначений задачи позволяют понять, в чём именно состоит каждая задача, чем она принципиально отлична от других. Показано, что между некоторыми задачами имеет место «генетическая связь», основанная на принципе усложнения свойств ПрО: в более сложных ПрО появляются новые виды исходных данных, которые надо учесть при решении задач (например, время, пространство, классы, причинно-следственные отношения,

события или неприсущие системе внутренние процессы), и дополнительные ограничения. Для различения классов сущностей обычно достаточно анализировать их признаки, а для различения диагнозов, как правило, и события.

Каждое усложнение ПрО рассматривается как «слой ПрО со схожими особенностями», в котором ожидается появление новых задач либо расширение постановок базового («корневого») множества задач.

Предложенные в настоящей работе математический аппарат алгебраических систем и выполненные с его помощью постановки различных задач дают возможность в процессе системного анализа переходить к математическим постановкам задач требуемого уровня абстракции.

Список литературы

- [1] Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский, *Базы знаний интеллектуальных систем*, Питер, СПб., 2000, 384 с.
- [2] Joseph C. Giarratano, Gary D. Riley, *Expert Systems: Principles and Programming*, Fourth Edition, Course Technology, 2004, 842 pp.
- [3] Peter Jackson, *Introduction to Expert Systems*, 3rd Ed, Addison-Wesley, 1998, 542 pp.
- [4] Ф. Хейес-Рот, Д. Уотермен, Д. Ленат, *Построение экспертных систем*, Мир, М., 1987, 441 с.
- [5] Д. Уотермен, *Руководство по экспертным системам*, Пер. с англ., Мир, М., 1989, 388 с.
- [6] W. J. Clancey, “Heuristic Classification”, *Artificial Intelligence*, 1985, № 27, 289–350.
- [7] Э. В. Попов, И. Б. Фоминых, Е. Б. Кисель, М. Д. Шапот, *Статические и динамические экспертные системы*, Учебное пособие, Финансы и статистика, М., 1996, 318 с.
- [8] Ю. Ф. Тельнов, *Интеллектуальные информационные системы*, МЭСИ, М., 2004, 246 с.
- [9] С. Н. Павлов, *Системы искусственного интеллекта*, Учеб. пособие. В 2-х частях. Т. 1, Эль Контент, Томск, 2011, 176 с.
- [10] D. Sriram, M. L. Maher and S. J. Fenves, “Knowledge-Based Expert Systems for Structural Design”, *Computers and Structures*, 1985, № 1, 1–9.
- [11] M. D. Rychener, “Expert systems for engineering design”, *Expert Systems*, 2:1 (1985), 30–44.
- [12] С. Рассел, П. Норвиг, *Искусственный интеллект. Современный подход*, Изд. дом «Вильямс», М., 2007, 1408 с.
- [13] И. Братко, *Алгоритмы искусственного интеллекта на языке PROLOG*, 3-е издание. Пер. с англ., Изд. дом «Вильямс», М., 2001, 640 с.
- [14] Э. В. Попов, Г. Р. Фирдман, *Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта*, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», М., 1976, 456 с.
- [15] Ф. М. Москаленко, “Задача медицинской диагностики и алгоритм её решения, допускающий распараллеливание”, *Информатика и системы управления*, 2005, № 2(10), 52–63.
- [16] А. С. Клещев, С. В. Смагин, “Задачи индуктивного формирования знаний для онтологии медицинской диагностики”, *Научно-техническая информация*, Серия 2. Информационные процессы и системы. Т. 1, ВИНТИ РАН, М., 2012, 9–21.
- [17] А. И. Мальцев, *Алгебраические системы*, Наука, М., 1970, 392 с.
- [18] *Большой Российский энциклопедический словарь*, БРЭ, М., 2003.

- [19] А. С. Клещев, М. Ю. Черняховская, Ф. М. Москаленко, “Модель онтологии предметной области «Медицинская диагностика». Часть 1. Неформальное описание и определение базовых терминов”, Серия 2, 2005.
- [20] А. С. Клещев, Е. А. Шалфеева, “Содержание системного анализа при автоматизации интеллектуальной деятельности на уровне отрасли”, *Материалы IV Междунар. научн.-техн. конф. "Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем" (OSTIS-2014)*, БГУИР, Минск, 2014, 285–290.

Представлено в Дальневосточный математический журнал 4 декабря 2015 г.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-03193) и ПФИ ДВО РАН “Дальний восток” (проект 15-I-4-029).

Kleshev A. S. Shalfeeva E. A. The statements of the practically useful problems of intelligent activity. *Far Eastern Mathematical Journal*. 2016. V. 16. № 1. P. 44–61.

ABSTRACT

Actuality of the classification based on general principles and terminology well-determined by mathematical apparatus is shown. The mathematical apparatus is suggested that allows to introduce mathematical abstractions for all the notions used in task specifications. A multilevel classification of tasks is proposed in that the basic classification of tasks is expressed rather abstractedly. Further, on the lower levels of abstractions special properties of domains are introduced and formally represented, and refined specification of tasks and new inherent tasks are suggested. *Key words: intelligent activity, expert system, classification of tasks, problem definition.*