

## РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ МНОГОЭТАПНОЙ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗНАНИЙ ДЛЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

М.А. Павленко  
(представил проф. Б.Н. Судаков)

*В данной статье предлагается процедура формализации знаний для автоматизации процессов принятия решений с использованием экспертных систем в автоматизированных системах управления сложными объектами.*

**Введение.** Решение задач автоматизации процессов управления сложными объектами с использованием экспертных систем (ЭС), требует применения эффективных методов представления знаний [1]. Знания при этом являются информационной основой для реализации процедур поиска решений (проведения логического вывода) [2].

В автоматизированных системах управления, функционирующих в реальном масштабе времени, методы формализации знаний для ЭС должны удовлетворять следующим основным требованиям [2 – 4]:

- учитывать возможность формализации различных аспектов знаний (алетических, дисизиональных, каузальных, дионтических и др.) [1, 3, 4];
- обладать свойством непротиворечивости;
- обеспечивать заданную степень полноты описания предметной области;
- обеспечивать заданную степень оперативности поиска решений;
- обеспечивать возможность получения множества альтернативных вариантов решений.

Реализация таких требований предполагает построение методов формализации, основанных на комбинировании различных моделей представления знаний [2 – 5].

Необходимо отметить, что использование сложных методов формализации знаний требует привлечения когнитологов высокой квалификации, обладающих знаниями о проблемной области, сравнимыми со знаниями эксперта [2], что является труднореализуемым. При этом процедура формализации требует многократных итераций для получения адекватных формализованных описаний.

При этом требуется применение специальных процедур формализации знаний. Кроме того, использование комбинированных моделей может привести к существенному усложнению самого процесса формализации знаний.

Таким образом, для ЭС, использующих комбинированные модели знаний, актуальным является разработка специальных методов формализации знаний, обеспечивающая упрощение данной процедуры с повышением ее оперативности при общем повышении степени адекватности формализованного описания знаний о программном обеспечении (ПО).

**Анализ литературы.** В известной литературе [2 – 7] предложено значительное количество моделей знаний, которые используются для формализации знаний. К таким моделям относятся: логические модели [2, 3], фреймовые модели [2 – 6], продукционные модели [2 – 6], искусственные нейронные сети [6, 8], семантические сети [2 – 6].

Процедуры выбора модели знаний и построения формализованного описания знаний о предметной области частично отражены в работах [4, 5]. В данных работах подразумевается, что когнитолог при формализации знаний использует одну модель знаний, «подгоняя» под нее знания, полученные от эксперта. Использование комбинированных моделей знаний при формализации знаний предложено в работах [2, 9], но совместное использование моделей подразумевается по умолчанию, и вопросы, связанные с построением единого метода формализации, не рассматривались.

**Цель работы.** Повышение адекватности процедуры формализации знаний за счет разработки процедуры многоэтапной формализации знаний для ЭС управления сложными объектами, функционирующими в реальном масштабе времени.

**Основная часть.** Разработка формализованного представления знаний о предметной области включает в себя несколько основных этапов [4]:

- 1) определение ограничений на объем знаний подлежащих формализации, выбор метода получения знаний от эксперта;
- 2) предварительная обработка полученных экспертных знаний. Выявление характерных связей между объектами и понятиями;
- 3) дополнение полученных знаний от эксперта;
- 4) формализация знаний;
- 5) уточнение формализованных описаний;
- 6) тестирование и дополнение формализованного описания ПО.

При разработке формализованного представления знаний о предметной области необходимо учесть логико-аналитический характер решения задач принятия решений, особенность деятельности лица принимающего решения, направленной на приведение управляемой системы к

заданному целевому состоянию. Для формализации таких задач обосновано [2, 9] использование сетевых и логических моделей знаний. В частности речь идет об использовании комбинированных моделей, основанных на использовании структуры целевых установок (СЦУ) и исчисления предикатов первого порядка (ИП).

При этом СЦУ задается в виде кортежа [2, 9]:

$$T_{\text{по}}^{\text{сцу}} = \langle W^{\text{сцу}}, M^{\text{сцу}} \rangle, \quad (1)$$

где  $T_{\text{по}}^{\text{сцу}}$  – формализованная теория ПО построенная с использованием СЦУ;  $W^{\text{сцу}}$  – множество целей (состояний) процесса управления;  $M^{\text{сцу}}$  – множество отношений между элементами множества  $W^{\text{сцу}}$ .

Основными элементами данного аппарата формализации (АФ) являются цель и отношение [2, 9]. Цель – состояние предметной области, которое характеризуется [9, 10]:

- множеством состояний объектов физической реальности;
- множеством событий;
- правилами переходов;
- действиями, которые необходимо выполнить для достижения объектом некоторого состояния.

В общем случае [2, 9, 10] формализованное описание цели может включать некоторое множество формул  $\Phi_a = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ , соединенных между собой логическими операторами  $\wedge, \vee, \neg, \equiv, \rightarrow$  (конъюнкции, дизъюнкции, отрицания, эквивалентности, импликации):

$$x_1 R x_2 R \dots R x_m \rightarrow y, \quad (2)$$

где  $R$  – один из логических операторов  $\wedge, \vee, \neg, \equiv, \rightarrow$ ;  $y$  – некоторая цель, достижение которой возможно при условии выполнения формул  $x_1, x_2, \dots, x_m$ .

В соответствии с эти, цель представим кортежем

$$W^{\text{сцу}} = \langle O_{\text{об}}, S_{\text{об}}, N_{\text{ц}}, H_{\text{ц}}, D_{\text{ц}}, M_{\text{ц}}, C_{\text{ц}} \rangle, \quad (3)$$

где  $O_{\text{об}}$  – множество объектов целевого воздействия;  $S_{\text{об}}$  – множество состояний объектов целевого воздействия;  $N_{\text{ц}}$  – множество начальных условий, определяющих достижения цели;  $H_{\text{ц}}$  – множество необходимых условий достижения целей;  $D_{\text{ц}}$  – множество достаточных условий достижения целей;  $M_{\text{ц}}$  – множество целей возможно достижимых при истинности данной цели;  $C_{\text{ц}}$  – множество событий, позволяющих осуществить распознавание целевой ситуации.

Логическая последовательность достижения целевых состояний определяется отношениями между ними. Отношением называется связь между целями, отражающая свойство взаимодействия между ними. Такими свойствами могут быть следование, подчинение, пространственные либо временные характеристики и др.

Таким образом, формально отношение представляется следующим кортежем [9, 10]:

$$M^{CЦУ} = \langle Rs, Ns, Ps, Ts \rangle, \quad (4)$$

где  $Rs = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$  – множество ресурсов [2];  $Ns = \{Ns_i(r_j)\}$  – множество нормативных правил использования ресурсов;  $Ps = \{Ps_k(r_j)\}$  – множество нормативных правил расхода запаса воздействий ресурсов;  $Ts$  – интервал времени, определяющий продолжительность действия.

Использование аппарата СЦУ сопряжено с рядом трудностей:

- 1) процесса формализации знаний ;
- 2) реализации процедур проверки непротиворечивости формализованного описания;
- 3) реализации процедур проверки полноты формализованного описания;
- 4) соотношения процедур прагматической интерпретации с конкретными вершинами;
- 5) представления семантической (качественной) информации, которой оперируют эксперты, признаковой (количественной) которой оперирует СЦУ.

Указанных недостатков практически лишен формальный аппарат ИП, использующийся наряду с СЦУ в рассматриваемой комбинированной модели знаний.

Формализованное представление знаний о определенной ПО с использованием формального аппарата ИП [2 – 4] задается кортежем:

$$T_{по}^{ИП} = \langle L^{ИП}, C^{ИП}, S \rangle; \quad (5)$$

где  $T_{по}^{ИП}$  – формализованное представление знаний ПО основанное на ИП;  $L^{ИП}$  – формальный язык ИП [2 – 4];  $C^{ИП}$  – операции присоединения следствий;  $S$  – множество нелогических аксиом, описывающих свойства ПО [2, 3], заданных с использованием формального языка  $L^{ИП}$  и операции присоединения следствий  $C^{ИП}$ .

Формальный язык исчисления предикатов  $L^{ИП}$  задается следующим алфавитом  $A_{ИП}$  [2 – 4]:

- 1) знаки логических операций  $\wedge, \vee, \neg, \equiv, \rightarrow$ ;
- 2) знаки кванторов  $\exists, \forall$ ;
- 3) знаки пунктуации ( );
- 4) предметные переменные  $x, y, z, \dots$ ;
- 5) предметные постоянные  $a, b, c, \dots$ ;
- 6) функциональные символы  $f, g, h, \dots$ ;
- 7) предикатные буквы  $P, Q, R, S, T, V, N$ .

В свою очередь, операция присоединения следствий  $C^{ип}$  для формализованной теории  $T_{по}^{ип}$  определяется следующим образом [3, 5]. На  $T_{по}^{ип}$  выделяется некоторое множество формул, называемых аксиомами теории, и задается конечное множество отношений между формулами  $R_1, R_2, \dots, R_m$ , называемых правилами вывода. Если множество формул  $A_1, A_2, \dots, A_k \in T_{по}^{ип}$  находятся в отношении  $R_m$  с формулой  $B \in T_{по}^{ип}$ , то  $B$  называется непосредственным следствием формул  $A_1, A_2, \dots, A_k$  по правилу  $R_m$ . Определение распространяется на любое множество исходных формул из  $T_{по}^{ип}$ .

Для разрешения трудностей связанных с формализацией знаний при использовании комбинированных моделей знаний предлагается использовать процедуру поэтапной формализации знаний.

Для обоснования данного утверждения докажем следующую теорему.

**Теорема 1.** Формализованное описание целеполагающих задач принятия решений составленное с использованием ИП первого порядка отображается в формализованное описание целеполагающих задач принятия решений составленное с помощью СЦУ с точностью до изоморфизма.

Доказательство данной теоремы проведем, используя аппарат и понятия теории категорий и топосов [2].

Пусть существует адекватное преобразование высказываний о целеполагающих задачах принятия решений, представленных на естественном языке  $O_{по}$  высказываниями, представленными ИП первого порядка. Тогда можно говорить о существовании морфизмов, которые задают правила отображения высказываний представленных на естественном языке в высказывания ИП первого порядка. Приведем эти морфизмы.

1. Морфизм приведения высказываний естественного языка  $O_{по}$  описывающие предметные константы ПО в предметные константы ИП

$$\mu_1 : O_{пок} \rightarrow \{a, b, c, \dots\} \in A_{ип} . \quad (6)$$

2. Морфизм приведения высказываний естественного языка  $O_{по}$  описывающие предметные переменные ПО в предметные переменные ИП

$$\mu_2 : O_{пок} \rightarrow \{x, y, z, v, \dots\} \in A_{ип} . \quad (7)$$

3. Морфизм приведения высказываний естественного языка  $O_{по}$  описывающие свойства ПО в  $n$ -местные предикаты первого порядка, которые строятся по правилам построения предикатов с использованием предметных констант, предметных переменных, кванторов, логических связок и модальных операторов:

$$\mu_3 : O_{пок} \rightarrow \langle I_i^{ип}, C_j^{ип}, S_n \rangle . \quad (8)$$

Используя свойства морфизмов [2], всегда можно построить обратные морфизмы морфизмам  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ , что соответствует возможности интерпретации высказываний ИП высказываниями естественного языка:

$$\mu_1^{-1} : \{a, b, c, \dots\} \in A_{ип} \rightarrow O_{пок} ;$$

$$\mu_2^{-1} : \{x, y, z, v, \dots\} \in A_{ип} \rightarrow O_{пок} ; \quad (9)$$

$$\mu_3^{-1} : \langle I_i^{ип}, C_j^{ип}, S_n \rangle \rightarrow O_{пок} .$$

В свою очередь можно построить морфизмы которые отображают соответствующие высказывания ИП первого порядка в элементы СЦУ. Такие морфизмы перечислены ниже.

1. Морфизм, отображающий множество высказываний ИП, описывающих предметные константы и функциональные переменные ПО, во множество объектов целевого воздействия  $O_{об} = \{o_1, o_2, o_3, \dots\}$  либо множество ресурсов  $Rs = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$  :

$$\varphi_1 : \{a, b, c, \dots\} \cup \{f, g, h, \dots\} \rightarrow \{o_1, o_2, o_3, \dots\} ; \quad (10)$$

$$\varphi'_1 : \{a, b, c, \dots\} \cup \{f, g, h, \dots\} \rightarrow \{r_1, r_2, \dots, r_m\} .$$

2. Морфизмы, отображающие множество высказываний ИП, описывающих предметные константы и переменные ПО во множество состояний объектов целевого воздействия  $S_{об} = \{s_1, s_2, s_3, \dots\}$ :

$$\varphi_2 : \{a, b, c, \dots\} \cup \{x, y, z, v, \dots\} \rightarrow \{s_1, s_2, s_3, \dots\} . \quad (11)$$

3. Учитывая то, что цель можно представить в виде множества формул (2), можно задать морфизм отображающий множества нелогических аксиом  $S = \{s_{ип1}, s_{ип2}, s_{ип3}, \dots\}$  во множество начальных условий, определяющих достижение цели  $H_{ц} = \{h_1, h_2, h_3, \dots\}$ , либо множество нормативных правил использования ресурсов  $Ns = \{Ns_i(r_j)\}$  :

$$\Phi_3 : \{s_{ип1}, s_{ип2}, s_{ип3}, \dots\} \rightarrow \{H_1, H_2, H_3, \dots\}; \quad (12)$$

$$\Phi'_3 : \{s_{ип1}, s_{ип2}, s_{ип3}, \dots\} \rightarrow \{Ns_i(r_j)\}.$$

По аналогии возможно построение морфизмов и для других элементов кортежей  $W^{сцУ}$  и  $M^{сцУ}$ , которые можно выразить, используя алфавит  $A_{ип}$ , логические, нелогические и модальные формулы ИП.

Для всех морфизмов (10 – 12) возможно построение обратных морфизмов, что соответствует возможности представления свойств целей и отношений в виде высказываний ИП, исходя из определений данных для цели и отношения и их свойств:

$$\Phi_1^{-1} : \{o_1, o_2, o_3, \dots\} \rightarrow \{a, b, c, \dots\} \cup \{f, g, h, \dots\};$$

$$\Phi'_1 : \{r_1, r_2, \dots, r_m\} \rightarrow \{a, b, c, \dots\} \cup \{f, g, h, \dots\};$$

$$\Phi_2^{-1} : \{s_1, s_2, s_3, \dots\} \rightarrow \{a, b, c, \dots\} \cup \{x, y, z, u, \dots\};$$

$$\Phi_3^{-1} : \{H_1, H_2, H_3, \dots\} \rightarrow \{s_{ип1}, s_{ип2}, s_{ип3}, \dots\};$$

$$\Phi'_3 : \{Ns_i(r_j)\} \rightarrow \{s_{ип1}, s_{ип2}, s_{ип3}, \dots\}.$$

Таким образом, показано, что возможно адекватное преобразование формализованного описания задач целеполагания с использованием ИП в СЦУ и из СЦУ в ИП и высказывания представленные на естественном языке и такое преобразование адекватно и изоморфно.

Теорема доказана.

Используя результаты, полученные при доказательстве теоремы 1, можно разработать метод многоэтапной формализации знаний о ПО для использования их в процессе решения задач управления в системе управления сложными объектами.

Определим основные шаги, реализация которых позволит перейти от разрозненного описания свойств ПО к единой формализованной модели знаний ПО.

1. Знания о ПО, представленные в виде высказываний на естественном языке, используя свойства морфизмов (4) либо (10), формализуем с использованием аппарата формализации СЦУ либо ИП.

2. Выделяем множество аксиом, которые описывают цель системы управления, либо цель, определенную средствами естественного языка, формализуем с помощью ИП и таким образом при помощи морфизма (10) формируем формализованное описание целей для системы управления.

3. Выделяем множество аксиом, которые описывают отношения в системе управления, либо отношения определенные средствами естественного языка формализуем с помощью ИП и таким образом при по-

мощи морфизмов (4), (5), (6), (7), (10) формируем формализованное описание отношений для системы управления.

4. Формализованные описания целей и отношений между ними разработанные при выполнении п.п. 1 – 3 представим в виде формализованного описания знаний о ПО формализованной теорией –  $T_{\text{ПО}}^{\text{сн}} .$

5. Учитывая изоморфность морфизмов (4) – (7), (10) повторяем п.п. 1– 4 до тех пор, пока не будет получено удовлетворительное формализованное описание знаний о ПО.

Поясним вышеизложенное на примере.

Пусть существуют правило отнесения какого либо объекта к определенному классу объектов обладающих сходными свойствами. Это правило имеет следующий вид (рис. 1 – сетевое представление):

$$\forall_i \exists_j \left[ P_1(w_i^W, g_j^G) \right] \vee \exists_k \exists_l \left[ P_2(w_k^W, c_l^C) \right] \vee \exists_m \exists_n \left[ P_3(g_m^G, g_n^G) \right] \rightarrow \exists_p P_4[g_p^G, G], \quad (13)$$

где  $\forall_i \exists_j \left[ P_1(w_i^W, g_j^G) \right]$  – предикат интерпретируется следующим образом: для всех объектов  $w_i^W$ , которые принадлежат к множеству  $W$  объектов, существует класс  $g_j^G$ , который принадлежит к множеству классов  $G$ , к которым могут принадлежать объекты;  $\exists_k \exists_l \left[ P_2(w_k^W, c_l^C) \right]$  – предикат интерпретируется следующим образом: существуют объекты  $w_k^W$ , которые принадлежат к множеству  $W$  объектов, и объект является также групповым объектом  $c_l^C$  и принадлежит к множеству групповых объектов  $C$ , то создается новый класс объектов;  $\exists_m \exists_n \left[ P_3(g_m^G, g_n^G) \right]$  – предикат, который интерпретируется следующим образом: если существуют классы объектов такие, что параметры, характеризующие классы объектов близки, то эти классы объединяются в один класс;  $\exists_p P_4[g_p^G, G]$  – предикат, интерпретируемый следующим образом: если воздушный объект  $w_i^W$  не включен ни в один из классов  $g_p^G$ , то со-

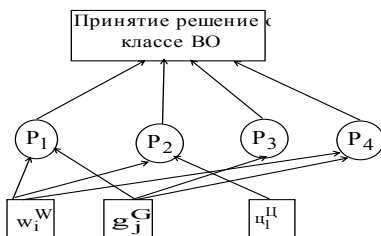


Рис. 1. Сетевое представление правила отнесения объекта к определенному классу



здается новый класс  $g_{p+1}^G$ , который включается в алфавит классов объектов  $G$ .

При этом структура целей, достижение которых возможно при решении данной задачи, представлена на рис. 1.

Построим обобщенную сетевую модель данного правила (рис. 1).

**Вывод.** Разработанный метод многоэтапной формализации знаний при использовании комбинированных методов формализации знаний о программном обеспечении позволяет упростить процедуру создания формализованного описания знаний программного обеспечения. Также разработанный метод позволит осуществить проверку полноты и непротиворечивости разработанной модели знаний о программном обеспечении, а также [2, 9] использовать данную модель знаний для создания ЭС реального времени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ДСТУ 2481-94. Системи оброблення інформації. Інтелектуальні інформаційні технології. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 30 с.
2. Бондарев В.Н., Аде Ф.Г. Искусственный интеллект: Учебное пособие для вузов. – Севастополь: СевНТУ, 2002. – 615 с.
3. Ярушек В.Е., Прохоров В.П., Судаков Б.Н., Мишин А.В. Теоретические основы автоматизации процессов выработки решений в системах управления. – Х.: ХВУ, 1993. – 446 с.
4. Представление и использование знаний: Пер. с японского / Под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. – М.: Мир, 1987. – 220 с.
5. Искусственный интеллект. Справочник в 3-х книгах. Книга 2. Модели и методы / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
6. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
7. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике: Пер. с французского. – М.: Радио и связь, 1990. – 287 с.
8. Нейрокомпьютеры и интеллектуальные роботы / Под ред. Н.М. Амосова. – К: Наук. думка, 1991. – 272 с.
9. Искусственный интеллект в системах управления. Научно-методические материалы. Ч. I. – Х.: ВИРТА ПВО, 1989. – 283 с.

Поступила 20.08.2004

**ПАВЛЕНКО Максим Анатольевич**, адъюнкт кафедры Харьковского Университета Воздушных Сил. Область научных интересов – формализация знаний в экспертных системах.

*E-mail: [bpgpma@list.ru](mailto:bpgpma@list.ru).*

---