

УДК 62.506.29:519

# ЛОГИКА УСЛОВНО-ЗАВИСИМЫХ ПРЕДИКАТОВ В РЕШАТЕЛЯХ ЗАДАЧ АВТОНОМНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

**В.Б. Мелехин**

*Дагестанский государственный технический университет*  
Россия, 367015, Махачкала, Имама Шамиля, 70  
E-mail: [pashka1602@rambler.ru](mailto:pashka1602@rambler.ru)

**В.М. Хачумов**

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН*  
Россия, 119333, Москва, ул. Вавилова, д.44, к. 2  
E-mail: [vmh48@mail.ru](mailto:vmh48@mail.ru)

**М.В. Хачумов**

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН*  
Россия, 119333, Москва, ул. Вавилова, д.44, к. 2  
E-mail: [khmike@inbox.ru](mailto:khmike@inbox.ru)

**Ключевые слова:** автономные интеллектуальные системы, представление знаний, обработка знаний, логика условно-зависимых предикатов, нечеткие семантические сети, планирование поведения, проблемная среда.

**Аннотация.** Разработана модель представления и обработки знаний автономных интеллектуальных систем безотносительно к конкретной предметной области на основе формул логики условно-зависимых предикатов в сочетании с применением нечетких семантических систем для описания ситуаций проблемной среды. Предложенная модель обеспечивает возможность планирования целенаправленного поведения автономных интеллектуальных систем различного назначения в априори недоопределенных проблемных средах с полиномиальной сложностью решения различных практических задач. Синтезирован субъектно-предикатный условно-зависимый язык логики условно-зависимых предикатов. Доказано условие выполнимости формул предложенной логики, определяющих автоматически построенный план поведения автономной интеллектуальной системы в текущих условиях проблемной среды.

Одной из актуальных проблем искусственного интеллекта является разработка эффективных моделей представления и обработки знаний автономных интеллектуальных систем (АИС) различного назначения для планирования целенаправленной деятельности в реальных, по сложности априори недоопределенных, проблемных средах (ПС). Например, автономных беспилотных летательных аппаратов (АБЛА) (квадрокоптеров снабженных манипулятором), автономных интеллектуальных роботов, систем автоматического проектирования и управления технологическими процессами и т.д.

В настоящее время к одной из наиболее широко применяемых в системах искусственного интеллекта моделей представления и обработки знаний следует отнести использование логики предикатов первого порядка. Однако, эффективное применение

организованных на этой основе решателей задач для планирования целенаправленного поведения АИС в априори недоопределенных условиях ПС ограничено следующими основными проблемами: необходимостью формального описания подробной модели закономерностей ПС для вывода решений [1]; отсутствием возможности использования в моделях представления знаний предикатов второго и большего порядков, что значительным образом снижает функциональные возможности построенных на их основе интеллектуальных решателей задач [2]; трудоемкостью вывода решений сложных задач в процессе обработки знаний, который сводится к доказательству теорем методом перебора, имеющим в общем случае экспоненциальную сложность [3].

В докладе предлагается один из подходов, основанный на представлении и обработке знаний АИС с помощью логики условно-зависимых предикатов (ЛУЗП) в сочетании с нечеткими семантическими сетями (НСС) [4], служащими для описания ситуаций ПС. Данный подход позволяет, с одной стороны, определять декларативные и процедурные знания АИС безотносительно к конкретной предметной области, а с другой стороны, значительным образом обойти отмеченные выше недостатки известных логических моделей. В частности использование ЛУЗП в сочетании с НСС обеспечивает возможность автоматического построения планов целенаправленного поведения АИС с полиномиальной сложностью второго порядка и решения на этой основе практических задач в различных сложных ПС [5-7].

Основу формализации ЛУЗП определяет субъектно-предикатный условно-зависимый язык, который отличается от известного субъектно-предикатного языка [3] тем, что в нем предметные переменные (ПП) определяются рядом характерных для них признаков, обеспечивающих им различную степень общности [8]. Другими словами, объекты ПС и условно-зависимые предметные переменные в формулах языка ЛУЗП определяются множествами биективно соответствующих им характеристик. Это, в свою очередь, позволяет организовать означивание ПП в различных формулах языка только теми объектами ПС, которые обладают характеристиками соответствующими этим переменным.

В докладе представлен алфавит условно-зависимого субъектно-предикатного языка, а также его правильно построенные выражения: элементарные термины, термины, атомарные формулы и формулы. Доказано, что произвольная формула ЛУЗП является выполнимой в заданной модели ПС, если в ней имеются объекты, использование которых для означивания ПП этой формулы позволяет получить соответствующие им истинные высказывания. В противном случае данная формула является невыполнимой в заданных условиях ПС. Таким образом, выполнимость формул ЛУЗП в конкретных условиях ПС, из которых формируется план целенаправленной деятельности АИС, проверяется путем их означивания с помощью ее объектов по истинностному значению получаемых в результате высказываний.

В качестве формального описания ситуаций ПС предлагается использовать НСС представляющие собой нечеткий мультиграф, вершины которого помечаются либо конкретными объектами проблемной среды, либо множеством характеристик, которыми должны обладать объекты ПС, чтобы была допустимой их пометка данными объектами [7]. Дуги данных графов помечаются отношениями пространства состояний, которые выполняются между объектами ПС, либо должны выполняться между ними согласно заданной АИС цели поведения.

В докладе показано, что для представления знаний АИС безотносительно к конкретной предметной области можно использовать формулы ЛУЗП двух типов.

1. Пусть даны две формулы ЛУЗП:  $P_1(y(X_1))$  – «Быть (объектом ПС  $y(X_1)$ )» и  $P_2(f_i(y(X_{f_i})))$  – «Уметь летать ( $y(X_{f_i})$ )». Здесь  $f_i$  – функциональный символ, озна-

чающий, что все объекты ПС, обладающие характеристиками  $X_{fi}$ , могут летать. Связывая между собой данные формулы конъюнкцией, получим формулу  $D = P_1(y(X_1)) \& P_2(f_i(y(X_{fi})))$ , которая означает «Быть объектом ПС, умеющим летать». Данная формула является выполнимой, если  $X_{fi} \subseteq X_1$ , в противном случае, она противоречива в текущих условиях ПС.

**Определение 1.** Формула  $P_1(y_1(X_1)) \& P_2(f_i(y(X_{fi})))$  называется условно-зависимым логическим дополнением или просто дополнением первого типа формулы  $P_1(y_1(X_1))$  и обозначается  $P_1(y_1(X_1), f_i(X_{fi}))$ , если выполняется условие  $X_{fi} \subseteq X_1$ .

Таким образом, на основе дополнений первого типа выполняется представление декларативных знаний АИС, которые позволяют устанавливать различные факты об объектах и событиях ПС и пополнять знания на этой основе, например, определить обладает или не обладает тот или иной объект среды умением летать. Ответ на данный запрос будет утвердительным, если для дополнения  $P_1(y_1(X_1), f_i(X_{fi}))$  и объекта ПС  $o_j(X_j)$  выполняется условие « $X_1 \subseteq X_j$ ».

2. Для представления процедурных знаний АИС на основе формул ЛУЗП используются логические дополнения второго типа. Пусть заданы следующие формулы:  $F_1 = P_1(\text{АБЛА}, y_1(X_1))$  - «Захватить (АБЛА, объект  $y_1(X_1)$ )»;  $F_2 = P_2(\text{АБЛА}, y_2(X_2))$  - Подлететь (АБЛА, объект  $y_2(X_2)$ );  $F_3 = P_3(\text{АБЛА}, y_3(X_3), \text{Безопасен})$  - Подлет от местоположения АБЛА до объекта  $y_3(X_3)$  является безопасным.

**Определение 2.** Формула  $F_1 \& F_2 \& F_3$  называется логическим дополнением второго типа формулы  $F_1$  и обозначается как

$$F_4 = P_1[\text{АБЛА} \rightarrow (P_3(y_1(X_1)) \rightarrow b_1(y_1(X_1)) \rightarrow b_2(y_1(X_1)))],$$

если выполняется условие  $(X_2 \subseteq X_1) \& (X_3 \subseteq X_1)$ , позволяющее провести замену переменных  $y_2(X_2)$  и  $y_3(X_3)$  на переменную  $y_1(X_1)$ , где:  $X_1$  - множество характеристик, которыми должны обладать объекты ПС,  $X_1 = \{a_1 - \text{габаритные размеры объекта, при которых рабочий орган манипулятора БПЛА способен его захватить; } a_2 - \text{вес объекта, который не должен превышать грузоподъемности манипулятора БПЛА; объект } y_1(X_1) \text{ не прикреплен к другому объекту и расположен в пределах рабочей зоны манипулятора БПЛА}\}$ ;  $P_1$  - идентификатор логического дополнения «Взять объект»;  $b_1(y_1(X_1))$  - действие «Подлететь к объекту  $y_1(X_1)$ »;  $b_2(y_1(X_1))$  - действие «Захватить и поднять объект  $y_1(X_1)$ ».

Полученную таким образом формулу можно интерпретировать следующим образом: если для произвольного объекта ПС  $o(X_j)$  высказывание  $P_3[o(X_j)] \& b_2(o(X_j)) \& b_1(o(X_j))$  является истинным (выполняется условие « $X_1 \subseteq X_j$ », а на пути подлета к этому объекту отсутствуют опасные зоны), то АБЛА может подлететь, захватить и поднять данный объект.

Таким образом, каждый предикат позволяет выделить в произвольной предметной области монотонную область допустимых значений ПП, т.е. значений при которых данный предикат при означивании ими становится истинным высказыванием. Для проверки выполнимости произвольных формул  $B$ , входящих в построенный на их основе план поведения АИС в конкретных условиях ПС, доказано следующее утверждение.

**Утверждение.** Формула  $B$  выполнима на произвольном множестве формул  $W$ , определяющих модель ПС, тогда и только тогда, когда для заданного означивания пе-

ременных  $I$  она принимает истинное значение, а формула  $T_1 = \sim (W_1 \& W_2 \& \dots \& W_i \& \dots \& W_m) \& B$  – ложное, а также верно условие, что множество формул  $W$  включает хотя бы одно дополнение второго типа  $W_i \in W$ , которое является обобщением для основного дополнения формулы  $B$ .

В докладе приводятся примеры решения следующих практических задач в сложных ПС:

- планирование поведения АБЛА оснащенного манипулятором в процессе выполнения сложного полетного задания [5, 6];
- пополнение знаний [9] и планирование поведения автономного интеллектуального подводного робота;
- автоматическое планирование технологических маршрутов обработки деталей в машиностроении [7].

Таким образом, предложенный подход, основанный на применении логики условно-зависимых предикатов в сочетании с НСС для описания ситуаций ПС, позволяет представлять и пополнять знания АИС различного назначения безотносительно к конкретной предметной области в процессе автоматического планирования целенаправленного поведения в априори недоопределенной сложной проблемной среде. Кроме того он обеспечивает возможность АИС приспосабливаться в процессе поведения к недоопределенным условиям ПС и эффективным образом на этой основе организовать свою целенаправленную деятельность в процессе решения сложных практических задач

## Список литературы

1. Ковальски Р. Логика в решении проблем. М.: Наука, 1990. 280 с.
2. Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Руководство. М.: Диалектика / Вильямс, 2015. 1408 с.
3. Люггер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / 4-е изд. М.: Вильямс, 2005. 863 с.
4. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Динамическая модель представления знаний в интеллектуальных системах контроля сложных технологических процессов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. № 2. С. 31-43.
5. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения интеллектуального беспилотного летательного аппарата в недоопределенной проблемной среде. Часть 1. Структура и применение фрейм-микропрограмм поведения // Искусственный интеллект и принятие решения. 2018. № 2. С. 73-83.
6. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения интеллектуального беспилотного летательного аппарата в недоопределенной проблемной среде. Часть 2. Структура и применение фреймов действий // Искусственный интеллект и принятие решения. 2018. № 2. С. 46-56.
7. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Интеллектуальная система автоматического проектирования технологических маршрутов обработки деталей в машиностроении // Автоматизация в промышленности. 2018. № 9. С. 13-20.
8. Мелехин В.Б. Логика условно-зависимых рассуждений: представление знаний и правила вывода умозаключений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 1. С. 65-74.
9. Мелехин В.Б. Пополнение знаний автономного интеллектуального робота в недоопределенных средах на основе комбинированных правил вывода логики условно-зависимых рассуждений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 3. С. 11-20.

## Приложение. Доказательство утверждения

1. Пусть, для означивания

$$I_1 = \{a_1(X_{a1}), a_2(X_{y2}), \dots, a_k(X_{ak})\}$$

формула  $B$  принимает истинное значение. Тогда если допустить, что формула  $B$  выполнима на множестве формул  $W$ , то формула  $T_1 = \sim (W_1 \& W_2 \& \dots \& W_i \& \dots \& W_m) \& B$  по определению должна быть ложной. Отсюда и формула  $\sim (W_1 \& W_2 \& \dots \& W_i \& \dots \& W_m)$  – ложная, так как формула  $B$  для означивания  $I_1$  – истинная. Следовательно, если формула  $B$  является истинной, то и формула  $W_1 \& W_2 \& \dots \& W_i \& \dots \& W_m$  для означивания  $I_1$  также истинна при условии, что формула  $T_1$  является ложной.

2. Пусть высказывание, получаемое из формулы  $W_i \in W$ , которая является обобщением базового дополнения формулы  $B$ , для означивания  $I_1$  является ложным. Следовательно, высказывание, получаемое из формулы  $B$ , для этого означивания также будет ложным. Отсюда формула  $T_1$  для означивания  $I_1$  будет истинной, что противоречит условию выполнимости формулы  $B$  на множестве заданных дополнений  $W$ . Следовательно, формула  $B$  в этом случае невыполнима на множестве формул  $W$ .

3. Из п. 1, 2 с очевидностью следует справедливость утверждения.