



В.Ю. МЕЙТУС

УДК 621.513.8

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Аннотация. Исследован и детализирован процесс интеллектуального моделирования предметных областей как составляющая действий интеллектуального субъекта, связанных с решением задач в этой области. Рассмотрено построение модели предметной области как множества знаний об отдельных составляющих этой области. Описание знаний каждой составляющей включает логическое и онтологическое представление, признаки этой составляющей и ее связи с другими элементами. Показано, что для описания предметной области как абстрактного представления может быть использована приемлемая математическая структура. Рассмотрен ряд таких структур и различные варианты логики.

Ключевые слова: интеллект, интеллектуальное моделирование, логика, знания, математические структуры, представление знаний, алгоритм моделирования, онтология.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее двадцатилетие интенсивно развивается классический искусственный интеллект, охватывающий новые области применения. Вместе с тем разрабатывается и иной подход к построению систем, которые обладают интеллектом, по своей направленности несколько отличающийся от классического искусственного интеллекта. Это направление можно назвать исследованием и построением систем, применяемых в некоторых предметных областях, обладающих интеллектом и использующим его для решения задач, относящихся к этой области. Такие системы назовем интеллектуальными системами (ИС).

Под интеллектом субъекта понимается свойство, позволяющее субъекту моделировать предметную область (ПрО), которую он воспринимает и с которой взаимодействует, чтобы на уровне построенной модели решать задачи, поставленные перед субъектом в этой области [1, 2].

Таким образом, интеллект, во-первых, всегда ориентирован на некоторую ПрО, которую он воспринимает и с которой взаимодействует, во-вторых, моделирует ее, чтобы в построенной модели формировать программы своих действий, и в-третьих, решает на модели поставленные в ПрО перед ним задачи, а затем проверяет результат решения непосредственно в ПрО при взаимодействии с ней.

Отметим, что можно рассматривать и исследовать интеллект, относящийся к нескольким взаимосвязанным ПрО. В этом случае общий подход состоит в том, что для каждой ПрО используется свой интеллект, а затем выбирается

© В.Ю. Мейтус, 2021

способ объединения этих интеллектов в зависимости от связей между областями. Но это уже отдельная задача.

Ориентация на определенную ПрО аналогична наиболее частому проявлению человеком своего интеллекта в некоторых фиксированных областях. Например, он может быть физиком или математиком, биологом или химиком, музыкантом или писателем, историком или шахматистом. Хотя и математик, и физик чаще всего эффективно работают в конкретной области математики или физики, например, ограничиваются теорией чисел или топологией. Но обычно творческая деятельность человека проявляется в определенной области, в которой он демонстрирует свои способности и интеллект, достигая именно в ней успехов в решении задач.

Точно также создаваемая ИС должна обладать интеллектом, который связан с определенной ПрО и определяет на своем уровне возможность системы решать различные задачи, которые могут быть заданы в этой области. Так, шахматист выигрывает шахматные партии, физик создает теории, подтверждаемые физическими экспериментами, а математик доказывает теоремы, отыскивая новые пути и преобразования, которые от исходных предположений приводят к новым результатам.

Наличие интеллекта в ИС предполагает, что система обладает двумя базовыми механизмами: первый — интеллектуальное моделирование, обуславливающее возможность восприятия и моделирования ПрО, которое заключается в построении модели данной области, второй — определен присущей интеллекту логикой, позволяющей формулировать и искать решения задач, используя построенную модель.

В настоящей работе рассматриваются общие принципы и методы, лежащие в основе создания первого механизма — интеллектуального моделирования, который входит в определение интеллекта и показывает, как ИС моделирует ПрО. Прилагательное «интеллектуальный» добавлено к термину «моделирование» для того, чтобы обратить внимание на процесс моделирования как составной части интеллекта, в контексте которого и рассматривается данный процесс.

1. ПРЕДМЕТНЫЕ ОБЛАСТИ

Предметная область — это часть реального, воображаемого или каким-то другим способом заданного мира, среды, окружения в пределах определенного контекста. Практически во всех работах, описывающих создание ИС [1–6], ПрО рассматривается как составная часть, определяющая применение интеллекта, которым обладает эта система. В этом смысле интеллект математика отличается от интеллекта композитора, а интеллект философа — от интеллекта поэта. Хотя иногда различные ПрО объединяют. Так, философ может использовать математическую теорию, чтобы излагать философские взгляды и положения (например, Бертран Рассел) или использовать языковое представление для описания философских проблем (например, Людвиг Витгенштейн).

Чтобы строить модель ПрО, прежде всего ИС должна абстрагироваться от реальности и создать свое представление об этой области, о ее структуре, элементах и связях. Такое представление об окружающей среде часто строится как множество точек, объектов (областей) некоторого пространства, в котором эти точки связаны между собой зависимостями и отношениями, определенными в данном пространстве. В [1, 2] это представление рассматривалось как некоторый универсум U , состоящий из концептов различного вида: понятия N , соответствующие объектам или конструкциям (классам объектов) ПрО; индивидуальные представители Id классов объектов, определяемых понятиями; атрибуты понятий M ; отношения R .

При этом предполагается, что ИС имеет органы восприятия информации, поступающей от внешних объектов среды. Например, у человека пять органов чувств, которые позволяют ему воспринимать окружающую среду и приспосабливаться к ней. Но эти органы чувств ориентированы в основном на непосредственное окружение, в котором человек существует с момента рождения. Для того чтобы расширить свое представление о среде, человек создает различные приборы, позволяющие ему получать новую информацию о микро- и макромире, использует электронные микроскопы, которые дают возможность увидеть вирусы, и различного вида телескопы, чтобы иметь представление о галактиках, отстоящих от Земли на миллионы световых лет.

Однако информации, которую ИС получает от своих органов чувств, обычно недостаточно для построения модели, позволяющей решать сложные задачи, эффективно демонстрировать свои интеллектуальные способности. Поэтому ребенок проходит длительный этап обучения и приспособления к внешнему миру, чтобы создать для себя его адекватную модель и понять, например, что не каждая понравившаяся ему кошка позволит себя погладить и не вцепится зубами и когтями в протянутую руку.

Создавая для себя представление о внешней среде, ИС не должна каждый раз заново строить ее описание. Для сокращения процесса приспособления к среде желательно, чтобы система использовала достоверные готовые знания об отдельных элементах, структурах и отношениях этой среды или других похожих сред. Эти знания ИС получает из базы знаний — составляющего элемента ИС. Такая база знаний содержит описание отдельных элементов, объектов, которые входят во внешнюю среду, описание допустимых структур среды, а также знания о возможных отношениях и преобразованиях, связывающих отдельные структурные элементы. Используя информацию, полученную из ПрО от своих органов восприятия, ИС и самостоятельно формирует свои представления, и пробует отыскать в базе знаний на основании полученной информации либо аналогичные объекты, либо похожие на них, чтобы расширить свое представление о ПрО, детализируя отдельные составляющие этого представления и корректируя свои восприятия. Этот подход позволяет сократить время, необходимое ИС для адекватного приспособления к окружающей среде и одновременно для обеспечения своей безопасности.

Таким образом, органы чувств и средства восприятия окружающей среды, а также база знаний являются основой, которая позволяет ИС построить представление о ПрО. Естественно, что такое представление может быть неполным. Некоторые составляющие среды не воспринимаются ИС, а в базе знаний могут отсутствовать знания о необходимых деталях отдельных объектов ПрО, наблюдаемых ИС. На такие объекты ИС обращает особое внимание, поскольку они требуют дополнительного исследования перед их использованием и последующим размещением в базе знаний. Кроме того, ИС необязательно полностью воспринимает все составляющие ПрО.

Возможно функционирование ИС в ПрО, для которых не используются органы чувств, а дано только описание этих областей в некоторой форме, в виде правил, аксиом, постулатов. Можно привести примеры из областей математики, физики, биологии. Так, в алгебре понятие моноида задается в виде множества S , на котором определена операция произведения элементов множества $x \in S, y \in S, (x, y) \rightarrow xy \in S$. Если операция произведения ассоциативна и в S существует единичный элемент, то множество S называется моноидом. Совокупность моноидов может рассматриваться как некоторая ПрО, описанная на уровне множеств, операций, аксиом, которым эти операции удовлетворяют. К этой ПрО

добавляются также различные примеры моноидов, и вся информация погружается в базу знаний, оформленную в виде теории моноидов. Для такого способа задания ПрО можно рассматривать ИС, которая должна получать результаты, связанные с моноидами.

Для этого в ИС используется важный составляющий элемент, позволяющий, с одной стороны, формально описывать различные части ПрО, а с другой — находить взаимосвязи этих частей. Таким элементом является логика, рассматриваемая как наука о законах, операциях и их композициях, которые предоставляют средства формализации рассуждений о некоторой среде на основании своих знаний о ней. Вывод в логике рассматривается как последовательность утверждений о заданной области, он согласован с законами и правилами, определяющими структуру ПрО, и связывает между собой исходные условия и ожидаемый результат. При этом и условия, и результат — это элементы ПрО.

Существуют и более общие ПрО, состоящие из множества W подобластей, каждая из которых может рассматриваться как ПрО. Эти подобласти связаны бинарным отношением $R \subseteq W \times W$. Пара (W, R) называется структурой основной ПрО, а каждый элемент из W , обозначающий подобласть основной области, называется состоянием (миром). Например, такая область, как математика, в действительности состоит из многих миров — алгебры, топологии, дифференциальных уравнений, геометрии, анализа и других разделов. Причем каждый из этих разделов, рассматриваемых как ПрО, также имеет свои подобласти, которые являются ПрО.

2. НЕСУЩИЕ СТРУКТУРЫ ПрО

Основой построения модели любой ПрО является ее представление, заданное в форме, которая использует некоторый язык знаний [2]. Чтобы построить такое представление, необходимо связать ПрО с некоторой математической структурой, которая в дальнейшем будет являться основой для построения модели. Структура рассматривается в смысле Н. Бурбаки [7]: общей характеристикой различных понятий, объединенных этим родовым названием (математической структурой), является то, что они применимы к множествам элементов, природа которых не определена. Чтобы определить структуру, задаются одно или несколько отношений, связывающих ее элементы, затем постулируются условия, которым удовлетворяют эти отношения и которые рассматриваются как аксиомы структуры.

ИС сохраняет в памяти множество таких структур как основу процесса моделирования. Очевидно, что представление ПрО тесно связано с возможностью восприятия области той ИС, которая действует в рассматриваемой ПрО. Таким образом, процесс интеллектуального моделирования, осуществляемый ИС, предполагает, что на основании информации, которую система собирает о ПрО, она может выбрать или построить некоторую несущую структуру, рассматриваемую как скелет модели этой области, и связать ее с ПрО.

Такое отображение называется интерпретацией рассматриваемой структуры в ПрО. В [2] отмечалось, что для одной и той же ПрО можно рассматривать и интерпретировать в ней различные математические несущие структуры, соотнесенные с различными областями математики. Такие интерпретации позволяют построить разные модели ПрО, и в зависимости от того, какая структура будет выбрана, используются различные методы, приемы, способы решения задач в этой ПрО.

Области, для которых такая интерпретация возможна, будем называть структурируемыми ПрО, в отличие от областей, где такое отображение отсутствует либо потому, что у ИС нет приемлемых структур, либо потому, что ин-

формация, полученная от органов восприятия, не позволяет соотнести ее с одной из структур, известных ИС. Такие области будем называть деструктурными. Отметим, что возможны варианты, когда только некоторые части ПрО являются структурируемыми, но существуют и деструктурные подобласти.

Рассмотрим вначале структурируемые ПрО. Приведем несколько базовых возможных вариантов различных структур, которые можно использовать при моделировании ПрО, выполняемом ИС. Отметим, что детальное исследование существующих вариантов таких структур и изложение результатов ограничено рамками журнальной статьи.

2.1. Концептуальные несущие структуры. В [1, 2] в качестве несущей структуры предлагалось использовать множество U — универсума, заданного как частично именованное множество объектов и конструкций ПрО, выделяемых ИС из области. Понятия N , соответствующие объектам или конструкциям области, индивидуальные представители Id класса объектов, определяемых понятиями, атрибуты понятий M , а также отношения R в совокупности включаются в универсум U и в дальнейшем называются концептами. Они формируют несущую структуру и применяются для интерпретации и построения модели ПрО.

В рассматриваемом случае интерпретация несущей структуры (концептов) возникает непосредственно на уровне концептов: понятий, отношений, атрибутов. Она предполагает, что смысл этих концептов и их содержание понятны ИС, которой известны имена, присваиваемые концептам. Это наиболее популярный подход к рассмотрению ПрО. Он базируется на знаниях, имеющихся у ИС, и используется разработчиками для построения модели ПрО на основании либо собственного опыта, либо результатов, описанных в различных публикациях.

Возможен и другой случай, когда вместо понятий оперируют определениями, т.е. понятие вначале определяется, а затем используется в качестве элемента несущей структуры. Этот прием характерен для математики, когда чаще всего вначале определяются понятия либо даются ссылки на существующие публикации, а затем выполняется построение необходимой несущей структуры. Таким образом, интерпретация несущей структуры в ПрО возникает на уровне определений.

Например, Д. Гильберт в «Основах геометрии» писал: «Рассмотрим три системы предметов. Назовем точками предметы, составляющие первую систему, прямыми — составляющие вторую, и плоскостями — третью». Суть этой цитаты заключается в том, что не следует задаваться вопросом о том, чем могут являться эти «предметы» [8]. Однако, естественно, что в дальнейшем эти предметы связываются с обычными представлениями хорошо известной геометрии.

2.2. Алгебраические несущие структуры. Данные структуры являются одними из наиболее известных представлений, которые в последние десятилетия используются для представления структуры разнообразных ПрО, относящихся, например, к таким областям, как программирование, теория процессов, формальная семантика, теория поведения агентов, транзитивные и динамические системы, теория ситуаций [5, 9–11].

Отношения, используемые в таких структурах, могут быть различными. Когда используются отношения типа композиции, такие структуры называются алгебраическими [12], хотя в общем случае алгебраическая структура рассматривается как множество с системой конечноместных операций (операторов). В некоторых случаях эти операции могут расширяться и заменяться конечноместными отношениями.

В общем случае алгебраическую структуру можно рассматривать как некоторое множество с заданной на нем системой операций. В соответствии с [12]

рассмотрим область операторов в виде множества Ω вместе с отображением, сопоставляющим каждому элементу множества его арность. Тогда Ω -алгебра задается множеством, на котором действуют операции из Ω .

Алгебраическая структура связывается с ПрО тогда, когда в ПрО могут быть выделены отдельные элементы, которые в дальнейшем ассоциируются с элементами множества A , а операции алгебры рассматриваются как возможные связи между элементами ПрО.

Обобщение алгебраической структуры осуществляется за счет дополнительного введения во множество A типов его элементов. В этом случае получаем типизированную алгебру, а типы задаются как подмножества A . Интерпретация такой алгебры в ПрО предполагает, что составляющим элементам ПрО присваиваются некоторые типы, которые дополняют характеристику ПрО или в зависимости от их использования разбивают множество элементов ПрО. Отметим, что в качестве типа можно рассматривать алгебру, теорию или категорию [13]. Но структуры с этими типами в приведенных несущих структурах — это, скорее, нерешенная проблема, требующая дополнительных исследований в рамках предлагаемого подхода.

2.3. Категориальные несущие структуры. В [2] в качестве несущей предлагалось рассматривать структуру в виде категории и была построена модель ИС с использованием категориального представления. Возможность связать ПрО с категориальной несущей структурой позволяет ИС решать задачи в этой области. Действительно, в информатике (computer science) получены многочисленные результаты, в основе которых лежит использование категорий для формализации соответствующих данных и процессов [13, 14].

Категории можно рассматривать как единый структурный подход к различным вариантам математического представления форм и процессов, связанных с ПрО. А введение операций в пространстве структур дает возможность оценить ПрО и определить, каким образом нужно представлять ПрО, чтобы успешно решать в ней задачи.

В [13] сформулированы следующие утверждения, которые определяют универсальность использования категорий как формы математических структур и их функцию несущей структуры при интеллектуальном моделировании:

- каждому виду математической структуры соответствует категория, чьи объекты имеют эту структуру и чьи морфизмы сохраняют ее;
- для любой естественной конструкции, определенной в структурах одного вида и преобразуемой в структуры другого вида, существует функтор из категории первого вида в категорию второго вида.

Отметим, что не только категории имеют широкое применение, связанное с разнообразными математическими структурами, но и их обобщения, например, топосы можно использовать как несущие структуры [15].

Описанные несущие структуры ориентированы на рассмотрение дискретных пространств, связанных с множествами, алгебрами, категориями. В то же время необходимо учитывать и другие возможные варианты несущих структур, например, структуры на основе рассмотрения топологических пространств и, в частности, многообразий.

2.4. Несущие структуры на основе топологических многообразий. Отметим, что топологическим многообразием, а далее — многообразием, будем называть хаусдорфово топологическое пространство V , у любой точки x которого существует замкнутая окрестность $U_x \subset V$ и гомеоморфизм $\varphi_x: U_x \rightarrow I^n$ на I^n — единичный куб евклидова пространства R^n [16, 17].

В рассматриваемом случае топологическое пространство V — структура ПрО, а связанное с ним евклидово пространство — это пространство, в котором отображаются значения, присваиваемые органами восприятия ИС элементам структуры ПрО, когда система анализирует окрестность U_x пространства V .

2.5. Нейронные сети. В [1] рассматривалось построение модели на основе ее спецификации — множества выделенных элементов ПрО со связывающими их отношениями (преобразованиями). Описанные ранее несущие структуры предусматривают данную спецификацию в виде элементов этих структур — составляющих и отношений. Однако возможен вариант, когда спецификацию в ПрО в явном виде определить нельзя, например, авторство картины или музыки. Сегодня нередко картины известных художников искусно копируются, а стиль и аранжировка композиторов имитируются. При этом уровень выполнения таких работ настолько высок, что не позволяет отличить копию от кисти мастера не только любителям, но даже профессионалам. Примеров таких подделок много. Так, Хан ван Мегерен в середине XX века подделал и продал Герингу картину Вермеера. А венгерский художник де Хори создал тысячи копий таких мастеров, как Пикассо, Модильяни, Матисс, Ренуар, причем часто даже эксперты не могли отличить подлинник от подделки. Это означает, что существуют ПрО — картины написанные в определенной технике и стиле, которые с трудом однозначно классифицируются даже с помощью экспертизы.

Однако в последние десятилетия разработан метод, позволяющий находить структуру сложной области, используя различные примеры таких областей. Этот метод основан на применении для поиска такой структуры многослойных нейронных сетей [18]. Созданная в американском университете сеть в результате обучения научилась с высокой вероятностью определять как самого художника, так и его жанр и стиль. Вначале на основании обучающих примеров в многомерном векторном пространстве (несущая структура) строятся векторы, характеризующие информацию о картинах определенного художника, а затем на основании сравнения векторов, которые вычисляются для неизвестной картины, определяется жанр, стиль и непосредственно художник. Более того, недавно была разработана нейронная сеть, которая может нарисовать заданную ей картину, например, в стиле Ван-Гога или Кандинского.

Таким образом, нейронные сети являются средством для формирования модели путем обучения несущей структуры, необходимой для построения желаемого представления ПрО. Эта структура формируется в процессе обучения некоторой исходной сети и включает нейроны, которые имеют достаточный вес, чтобы использоваться в ходе построения адекватной модели ПрО. Одна и та же нейронная сеть в процессе обучения может формировать различные несущие структуры.

Нейронные сети не единственный, хотя и популярный, механизм, который позволяет приспосабливаться к среде, формируя несущие структуры. Отметим среди разработанных методов адаптивного представления вероятностные методы, эволюционные алгоритмы, а также алгоритмы, называемые роевым интеллектом, которые применяются в последние годы [19, 20].

2.6. Формальные системы. Применение компьютеров для решения задач предполагает, что возможно моделирование ПрО с последующим построением интеллекта на основе использования вычислительных процессов, определяющих логику такого интеллекта. Наиболее общей формой этого представления являются формальные системы, определенные в [21, 22]. Формальная система задается, во-первых, языком с алфавитом \mathfrak{U} , в котором можно записывать конечные слова и формировать конечные совокупности слов, и во-вторых, — конечной совокупностью правил вывода P_1, P_2, \dots, P_n , где n -местным правилом вывода P в алфави-

те \mathfrak{U} называется рекурсивная совокупность n слов (a_1, \dots, a_n) в данном алфавите.

Например, возможна формальная система, которая в сочетании с логикой, определяемой правилами вычисления, задает вычислительный интеллект. Однако это понятие уже введено и используется с 1994 г. [23] по отношению к системам, которые применяют для решения задач нечеткую логику, мягкие вычисления, эволюционное моделирование, фракталы, нейронные сети. Поэтому в контексте приведенного определения интеллекта рассматриваемый интеллект с логикой, задаваемой вычислительным процессом, будем называть строгим вычислительным интеллектом (СВИ).

Существуют и другие варианты СВИ, которые используют несущие структуры в виде конечных или магазинных автоматов либо машины с одной или несколькими лентами (машины Тьюринга, Минского, Поста) [21], регистрами [24] или графами [25]. При построении СВИ каждый из этих вариантов требует отдельного исследования и рассмотрения. Эти варианты задают различные интеллекты и применяют разные логики решения задач. При этом логика заложена непосредственно в вычислительный механизм.

3. ЛОГИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Любую ПрО в общем виде можно представить в виде некоторого пространства, в котором существуют отдельные структурные элементы — объекты и отношения (связи) между ними. В совокупности эти элементы рассматриваются как универсум ПрО [1]. Они определяют спецификацию модели как множество выделенных элементов ПрО вместе со связывающими их отношениями. В эту спецификацию входит и совокупность преобразований, которые может выполнять ИС в ПрО. Кроме объектов, в пространстве могут существовать составляющие общей структуры, характерной для всего рассматриваемого пространства (поля), — признаки, присущие всем элементам. Модель ПрО представляется в виде совокупности знаний, охватывающих составляющие этой области. Здесь знания являются средством описания этой модели. Причем знания характеризуют как отдельные элементы, так и построенные из них описания структур ПрО. Другими словами, на уровне знаний строится представление мира, в котором действует ИС.

Рассмотрим основные этапы, выполняющиеся в процессе моделирования. Прежде всего предполагается, что этот процесс реализует ИС, которая взаимодействует с ПрО с помощью своих органов чувств или специальных устройств. ИС воспринимает эту область и ее составляющие. Каждый ее орган или устройство определяют некоторый показатель или показатели — признаки составляющей ПрО. На основании этих показателей ИС вырабатывает некоторое свойство, присваиваемое составляющему элементу. Совокупность всех этих свойств, сопоставленных каждому объекту ПрО, т.е. представление об объекте на уровне интенционала [1], является отдельной компонентой знания об этом элементе.

Объекты ПрО частично взаимосвязаны. По своим характеристикам отношения (связи) между объектами ПрО подразделяются на две группы: первая включает семантические связи, определяющие, каким образом соединены между собой отдельные объекты в более сложные структуры в данной области, вторая (преобразующая) — показывает, как взаимодействуют различные объекты в ПрО, как один объект может изменяться под воздействием другого или других объектов.

Указанные связи также являются дополнительной характеристикой каждого объекта, которой соответствует отдельный компонент в знании о нем. Причем некоторые связи или отношения могут реализовываться в рассматриваемой ПрО, а некоторые — отсутствовать в конкретной области.

Чтобы построить модель в пространстве, где заданы объекты и связи, необходимо выбрать подходящую несущую структуру, которая определит скелет будущей модели. При этом предполагается, что набор возможных структур известен заранее либо он создается как обобщение существующих представлений. (Например, гильбертово пространство как обобщение евклидова пространства в теории интегральных уравнений или переход в теории относительности от обычного трехмерного пространства к четырехмерному пространству Минковского.)

Общая проблема состоит в том, чтобы по известным элементам и структурам ПрО подобрать такую несущую структуру, которая позволила бы эффективно решать задачи в ПрО и совпадала бы со структурами похожих ПрО из базы знаний ИС. Выбор несущей структуры связан с методами, которые могут применяться ИС в данной ПрО.

Кроме того, как отдельный компонент представления знаний об элементах ПрО необходимо задать их логическое описание, включающее утверждения об этих элементах и их взаимосвязи. Для этого при моделировании ПрО выбирается некоторая логика.

Выбор подходящей логики для конкретного интеллекта — это одна из важных задач, от решения которой зависит как уровень интеллекта [1], так и все составляющие последующего процесса использования этого интеллекта, включая рассматриваемое моделирование. Логика — это язык, применяемый для задания компонента знаний, которые входят в модель ПрО. Проблема выбора и использования логики рассматривается в контексте [26, 27], т.е. определяются «наиболее адекватные формализмы для представления знаний и наиболее эффективные методы манипулирования этими формализмами».

Интеллект предполагает наличие способности моделировать ПрО и выполнять в построенной модели формальные преобразования для оценки и сохранения определенных признаков, рассматриваемых как способ оценки адекватности построенной модели и ПрО. Например, в качестве признака часто предлагается такое свойство, как «истина». В этом контексте логика рассматривается как формализм (язык), связанный с семантикой данной области и позволяющий интеллекту выполнять его функции описания ПрО и решения задач в ней, руководствуясь критерием истинности.

Как предлагалось в [2], для описания знаний о ПрО и решения задач в ней ИС использует одну и ту же логику, хотя система в действительности может применять одну из многих возможных схем задания логик и соответственно заданий интеллекта. И более того, построив модель ПрО, можно пополнить и расширить используемую логику для эффективного решения поставленных в ПрО задач. При этом может расширяться и представление модели, а также возникать новые подходы к решению задач.

Далее рассмотрим несколько возможных вариантов задания логики и ее использование в рамках интеллектуального моделирования ПрО. Общая схема такого задания состоит из двух составляющих. Вначале на уровне синтаксиса задается язык описания логических выражений, затем — интерпретация составляющих этого языка в моделируемой ПрО (семантика). Композиционный подход позволяет описывать на логическом языке отдельные составляющие ПрО, объединяя их при задании соответствующих знаний, после чего использовать логические выражения для решения интеллектуальных задач. Отметим, что в настоящее время существует большое количество различных вариантов задания логики, которые можно использовать при построении ИС. Рассмотрим несколько видов, которые отражают способность интеллекта решать задачи.

3.1. Предикатная логика. Одним из наиболее общих видов логики, используемой для моделирования, является логика предикатов — базовый вариант всех логических построений. Исчисление предикатов хорошо изучено. И хотя оно недостаточно эффективно при решении задач, но как форма их представления используется давно. Язык описания, включающий предикаты, вместе с его допустимыми расширениями является по сути стандартным и применяется для задания различных вариантов возможных логик [3, 15, 22, 27–29], которые могут использоваться для задания интеллекта.

Любой язык строится из алфавита, в котором с помощью заданной системы операций определяются его слова (формулы). Алфавит языка предикатов включает символы для обозначения переменных x, y, z, \dots , функциональные f, g, h, \dots и предикатные P, Q, R, \dots символы. Для функциональных и предикатных символов может указываться их арность $0, 1, 2, \dots$ в виде верхних индексов $f^{(n)}$ или $P^{(n)}$. Кроме того, чтобы различать символы, можно использовать нижние индексы.

Введем понятие термина. Каждое слово вида x или $f^{(0)}$ — это терм. Если t_1, t_2, \dots, t_n — термы, то слово $f^{(n)}(t_1, t_2, \dots, t_n)$ — терм. Других термов не существует.

Из термов и предикатных символов строятся формулы языка предикатов. Если t_1, t_2, \dots, t_n — термы, то $P^{(n)}(t_1, t_2, \dots, t_n)$ — формула.

Если $n=0$, то $P^{(0)}$ — формула. Иногда эти формулы называют атомом, чтобы сохранить понятие формулы для выражений языка, включающих логические операции: \neg — отрицание, \vee — дизъюнкция, \wedge — конъюнкция, \supset — импликация, \equiv — эквивалентность, либо включающих кванторы всеобщности \forall и существования \exists .

Формулу можно определить индуктивно:

- 1) атом — это формула;
- 2) если A — это формула, то $\neg A$ — формула;
- 3) если A, B — формулы, то $A \vee B, A \wedge B, A \supset B, A \equiv B$ — формулы;
- 4) если A — это формула, а x — переменная, то $\forall xA, \exists xA$ — формулы.

В случае 4 предполагается, что переменная x входит в формулу A , которая является ее областью действия, а применение квантора связывает эту переменную с заданной областью. Поэтому переменная x становится связанной, квантифицированной.

Для того чтобы логика предикатов распространялась на ПрО и ее можно было использовать в процессе моделирования, необходимо установить соответствие между формулами логики и универсумом ПрО. Такая зависимость рассматривается как интерпретация [27], позволяющая определить связь формул и реальных сущностей, воспринимаемых ИС в ходе ее взаимодействия с ПрО. Эта связь дает возможность анализировать на абстрактном (логическом) уровне реальные процессы, происходящие в ПрО, и зависит от конкретного выбора логики. Например, в [1, 2] рассматривалась дескриптивная логика с ее интерпретацией в ПрО.

Именно в ходе интерпретации и возникают логические компоненты знания об элементах универсума U , формируемого восприятием ПрО, а из знаний в дальнейшем строится модель ПрО, используемая интеллектом. В общем случае интерпретация задается как пара (D, I) , где D — область интерпретации, включающая воспринимаемый универсум (объекты, классы объектов, индивидуальные объекты, атрибуты, отношения), а I — интерпретирующая функция.

Область D формируется реальностью, которая заложена в ПрО, а функция I связывает эту реальность с терминами и формулами логики.

Каждый предикат рассматривается как функция, принимающая значения в области из двух значений $\{\text{true}, \text{false}\}$. Каждой n -местной константе функция I сопоставляет функцию из D^n в D , а каждой предикатной константе P^n — функцию из D^n в $\{\text{true}, \text{false}\}$.

При этом одноместный предикат присваивает атрибут своему аргументу, каждый двуместный предикат определяет бинарное отношение из R между своими аргументами, каждый трехместный предикат определяет тернарное отношение из R и т.д. Отметим, что любой унарный предикат можно преобразовать в бинарный, а каждый n -арный — в произведение бинарных [28].

На уровне знаний элементу универсума или структуре из элементов для данной ПрО сопоставляется логическая формула. Она является третьим составляющим компонентом знания об этом элементе или структуре, дополняющим два предыдущих. Эти три компонента объединяются в протознание [2]. Последующее включение в протознание онтологического описания для этого элемента ПрО завершает формирование знания о нем.

Логика высказываний и логика предикатов (классическая логика) не являются универсальными в том смысле, что существуют ПрО, знания о которых не могут быть формализованы в классической логике. Именно этим объясняются попытки найти для представления таких областей другие варианты логик, особенно с учетом способов рассуждений, применяемых человеком.

Такие логики являются расширением классической и близки к формам рассуждений и представлений, которые можно рассматривать как интеллектуальные. Далее приведены в качестве расширенных логик следующие классы: модальные, нечеткие, логики умолчания, а также логики, связанные с вычислениями. Каждому из этих классов соответствует своя форма интеллекта, способы интеллектуального моделирования и решения задач системой, построенной на основе такого интеллекта.

3.2. Модальная логика. Большой класс таких расширенных логик составляют модальные логики [20, 27–30]. К модальным логикам относятся логики веры, знаний, временная, алетическая, деонтическая и многие другие логики, которые расширяют классическую логику включением в нее модальностей и тем самым создают свое поле исследования, основанного на их использовании интеллекта.

Модальные утверждения дополняют обычные утверждения оценкой с определенной точки зрения. Если два объекта ПрО, представленные формулами A и B , взаимосвязаны, то на уровне модальности можно оценить, какова эта связь: необходимая или возможная; присущая данной ПрО или случайная; доказано или только предполагается существование связи; хорошо или плохо, что такая связь существует. Все эти дополнительные характеристики рассматриваемой связи определяются семантикой введенных для ее описания модальностей. При этом к модальным относятся не только понятия «необходимо», «присуще», «доказано», но и «знаем», «верим», «уверены», «сомневаемся», «допускаем», «лучше–хуже», «всегда–никогда» и т.д.

Введение модальностей привело не только к рассмотрению различных вариантов модальных логик, но и к построению логики оценок, состоящей из логик абсолютных и сравнительных оценок [30]. Применение оценок (модальностей) в процессе интеллектуального моделирования позволяет представить среду, в которой действует интеллект, как область, где формальный интеллект может найти связи с обычным человеческим интеллектом. Прежде всего это определяется

тем, что в своих рассуждениях человек сознательно или подсознательно всегда руководствуется наряду с обычными логическими связями индивидуальными оценками среды, которая моделируется и в которой нужно решать задачи.

Рассмотрим пример построения модальной логики на основе логики предикатов, расширенной введением в нее дополнительной пары кванторов, отвечающих модальностям «возможно–необходимо». Такая логика называется логикой возможного или алетической логикой. Для обозначения модальности «необходимо» используется операторный символ « \square », а для модальности «возможно» — операторный символ « \diamond ». Тогда формула $\square F$ читается и интерпретируется как «необходимо, чтобы F », а формула $\diamond F$ читается и интерпретируется как «возможно, что F ». Эти символы связаны эквивалентностью $\square F \equiv \neg \diamond \neg F$, аналогом предикатной формулы $\forall x F \equiv \neg \exists x \neg F$ [28].

Введение модальных символов в логику предикатов, имеющую свой набор аксиом, предполагает введение дополнительных аксиом в логику, расширенную этими символами. Соответственно появляется способность вывода новых утверждений, которые расширяют возможности решения задач в ПрО.

В общем случае применения модальной логики можно рассматривать мультимодальное расширение исходной логики, при котором вводится набор пар модальных операторов, где каждая пара рассматривается как аналог пары («возможно», «необходимо»), но со своей интерпретацией модальности [29].

3.3. Нечеткая логика. Исследуя проблемы интеллектуального моделирования, в качестве примера можно рассматривать интеллект человека — пока наиболее удачную из известных реализаций интеллекта. Однако восприятие человеком окружающего мира субъективно. Именно этот факт объясняет проявление повышенного интереса к художественной литературе: писатель открывает читателю новый, еще непознанный мир. Человек по-разному представляет и оценивает неточные, неполные, неоднозначные ситуации, совмещая их со своей логикой представления об окружающем мире. Поэтому и сама логика должна учитывать эту возможность, допуская неточность и неоднозначность в оценках истинности.

Примером такой логики является нечеткая логика [31, 32]. Эта логика основана на определении нечеткого множества A . Для каждого элемента x множества A задается функция принадлежности, определяющая в виде числа в интервале $[0,1]$ степень принадлежности x нечеткому множеству A . Появляется возможность охарактеризовать семантику неопределенности, связанную с принадлежностью элемента x нечеткому множеству. Используя множество A , можно определить нечеткую переменную, которая имеет область значения, совпадающую с A .

Расширением нечеткой переменной является лингвистическая переменная X с которой связывается терм-множество $T(X)$ лингвистических значений переменной X . Каждому такому значению сопоставляется нечеткая переменная. Таким образом, имеется двухуровневое представление лингвистической переменной. Вначале ей сопоставляются значения из множества $T(X)$, а затем этим значениям присваиваются нечеткие переменные. Из множества $T(X)$ с помощью заданной синтаксической процедуры можно строить новые значения переменной X с последующим переходом к новым нечетким множествам.

Используя введенную терминологию, можно трактовать понятие «истинность» как лингвистическую переменную, для которой «истинно» и «ложно» — это только значения в терм-мноестве. Соответственно можно констатировать истинность или ложность отдельного высказывания или предиката с некоторой степенью уверенности, которая определяется функцией принадлежности. Так появляются нечеткие высказывания и нечеткие предикаты.

каты, из которых затем с помощью логических функций формируются нечеткие логические выражения.

В качестве операций нечеткой логики рассматриваются обычные операции отрицания, конъюнкции, дизъюнкции, импликации. Но для каждой операции выбирается определенный метод построения функции принадлежности и соответственно правила задания описаний в ходе интеллектуального моделирования и правила решения задач в таких логиках.

В ходе интеллектуального моделирования нечеткая логика позволяет описывать ПрО и ее составляющие с некоторой степенью неточности, отражающей представление интеллекта об этой области, полученные в результате оценки каждой составляющей на основании ее восприятия ИС. Более того, использование нечеткой логики приводит к новой форме представления знаний — нечетким знаниям. В этой форме признаки объекта задаются нечеткими переменными, логическое описание объекта использует нечеткую логику, а связи между объектами определяются нечеткими функциями. Эти три компонента составляют протознание [2]. В свою очередь онтология, включаемая в знание, кроме общих понятий, может содержать и элементы терм-множеств, связанных с протознанием.

3.4. Логика умолчаний. Одним из интересных вариантов для выбора логики, которая применяется в процессе интеллектуального моделирования, является логика умолчания [27, 33, 34]. Часто интеллект используется для решения задачи или выполнения задания в условиях неполноты информации. Тогда учитываются правдоподобные выводы и рассуждения, поскольку при решении приходится делать некоторые предположения, допускать некоторые гипотезы. Такие ситуации нередко связаны с тем, что для описания знаний могут использоваться правила, справедливость которых всегда заранее не гарантирована и которые имеют некоторые исключения. Имеется в виду работа с выполнимыми утверждениями.

В математике давно существует подход, при котором доказывается математическая проблема в предположении, что справедлив другой, еще не доказанный результат. Так, в предположении справедливости гипотезы Римана решен ряд других математических проблем, например, получена оценка функции распределения простых чисел через интегральный логарифм.

Отметим, что формула A логики предикатов, записанная в языке \mathcal{L} выполнима в области D , если существуют такие значения переменных из A , принадлежащих D , что формула A истинна. Логика умолчаний одновременно использует логику предикатов с ее аксиомами и правилами вывода, а также дополнительно правила умолчания, содержащие представления об исключениях или предположениях, которые относятся к рассматриваемой ПрО.

Теория с правилами умолчания Θ — это пара (W, F) , включающая множество замкнутых предикатных формул W и счетное множество умолчаний F . Каждое правило умолчания имеет вид $(\varphi: \psi_1, \dots, \psi_n / \chi)$, где $\varphi, \psi_1, \dots, \psi_n, \chi$ — формулы логики предикатов. Суть этого правила заключается в следующем: если известно φ и можно предположить, что справедливы формулы ψ_1, \dots, ψ_n , то можно вывести формулу χ .

Пусть E — дедуктивно замкнутое множество формул. Правило умолчания $\delta = (\varphi: \psi_1, \dots, \psi_n / \chi)$ применимо к множеству E , если $\varphi \in E$ и $\neg\psi_1 \notin E, \dots, \neg\psi_n \notin E$.

Интуитивно использование логики умолчания основано на предположении, что множество существующих фактов можно расширить за счет добавления «разумных» предположений, которые основаны на фактах, рассматриваемых по умолчанию. В условиях применения логики по отношению к некоторой ПрО сделанные по умолчанию предположения могут быть существенными.

Так, например, в теории множеств можно рассматривать упорядоченные множества, потом добавить к этим множествам условие минимальности, а затем предположить существование точных верхней и нижней граней. Это приводит к определению понятия структуры, а если добавить конечность множества, то можно получить полную структуру. Таким образом, расширение предположений позволяет формировать различные ПрО.

Отметим, что теоретически рассматривались различные варианты и модификации логики умолчания (см. ссылки к [27, 34]).

4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

По определению, любой интеллект всегда связан с некоторой ПрО, а ее использование субъектом, который наделен интеллектом, автоматически связано с необходимостью моделирования этой области. Интеллектуальное моделирование (ИМ) заключается в том, что субъект представляет ПрО в виде системы знаний, которые могут быть организованы в виде базы знаний о ПрО, заданы сетью знаний или некоторой математической структурой. Знания о каждом элементе x из ПрО задаются в виде многокомпонентного набора и состоят из признаков, логической формулы, связей и онтологии. Первые три компонента определяют протознание, а последний — интерпретацию элемента x в онтологии, связанной с ПрО [2].

Процесс ИМ строится следующим образом.

1. В качестве составляющей создаваемой модели выбирается несущая математическая структура, рассматриваемая как скелет модели (см. разд. 2). На основании этой структуры из ПрО выбираются сущности, которые субъект (ИС) воспринимает, выделяет из области и присваивает им некоторое множество свойств (признаков, атрибутов).

2. К сущностям в ПрО относятся:

- объекты, воспринимаемые на данном уровне восприятия как некоторая целостность;
- экземпляры объектов;
- классы объектов;
- структуры, построенные из различных объектов, классов;
- связи и отношения между объектами, классами, структурами;
- совокупности объектов, рассматриваемые как единая сущность;
- процессы, рассматриваемые как последовательное изменение совокупностей объектов.

Предполагается, что каждая из этих сущностей может восприниматься и выделяться для моделирования субъектом из ПрО. При этом некоторые сущности, имеющие одинаковые или близкие свойства, могут объединяться в общий класс. Наконец, сущность можно сформировать в процессе моделирования при выделении других сущностей или она может возникнуть на основании выбора онтологии, связываемой с ПрО.

Кроме того, ИС содержит базу знаний, в которой представлены различные варианты предметных областей и их компонентов. Алгоритм ИМ предполагает возможность обращения к этой базе. Запрос строится на основании информации, которой субъект наделяет выбранные из ПрО сущности. Одновременно из базы можно выбрать и имеющееся окружение рассматриваемой сущности.

3. После построения модели ПрО интеллект проявляется как основа для решения задач в этой модели. Несущая математическая структура, связанная с ПрО, задает ядро формального подхода к решению будущих задач, к выбору необходимых методов и абстрактного подхода к представлению информации, которую нужно использовать при решении.

4. Формальной основой решения будущих задач является логика, которая вначале выбирается для построения модели ПрО. Логическое описание знаний является одной из составляющих его представления. В разд. 3 рассмотрены возможные варианты задания логики, которую можно использовать для описания знаний и последующего вывода следствий при решении задачи, но приведены только некоторые примеры. В действительности, возможных вариантов задания логики существенно больше [27, 28], и исследования в этом направлении постоянно продолжаются. Во многом от задания логики зависит эффективность интеллекта при решении задачи, а также сложность решаемых задач.

5. Процесс ИМ обычно включает несколько этапов. Другими словами, модель ПрО не создается сразу как однократное последовательное выполнение первых четырех шагов общего процесса построения. Как показывает практика, вначале на основании выбранного множества сущностей строится первое приближение модели. Затем она анализируется и рассматривается как представление ПрО для сравнения и проверки адекватности модели и ПрО. Возможно, что построенная модель отражает только некоторые характеристики ПрО и требует уточнения представленных в модели элементов. Тогда к паре (ПрО, модель) повторно применяется процесс моделирования как расширение построенной модели.

6. Созданная модель погружается в базу ИС. В дальнейшем из таких моделей формируется опыт субъекта или системы.

В зависимости от поставленных задач построение модели можно продолжить. При этом отдельные объекты или отношения могут рассматриваться как совокупности объектов или отношений, требующих дополнительного детального представления. Возможен также вариант, при котором для отдельных понятий онтологии необходимы определенные предположения или дополнительная декомпозиция, либо наблюдаемые признаки объекта исчерпывают его использование в ПрО, но в общем случае понятие оказывается более широким, чем воспринимаемое ИС. Поэтому на некотором этапе модель расширяется или пополняется отдельными экземплярами объектов или отношений. Эти дополнения также входят в модель ПрО.

Применительно к произвольной ПрО этот процесс многоуровневого построения модели называется интеллектуальным анализом. Применению этого анализа в конкретной ПрО (экономике) предполагается посвятить отдельную статью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается процесс интеллектуального моделирования как составляющая часть интеллекта. В свою очередь интеллект связан с ПрО, в которой действует интеллектуальный субъект. Моделирование — это процесс представления ПрО, в которой субъект должен решать соответствующие задачи.

Модель ПрО представляется в виде совокупности знаний, охватывающих составляющие этой области. При этом знания являются средством описания этой модели и определяются с помощью языка, включающего логику описания соответствующей сущности ПрО, его свойства используют для моделирования некоторой абстрактной формальной структуры в виде математической формализации. Процесс моделирования заключается в последовательном переходе от описания ПрО к структуре знаний, сопоставленных составляющим элементам ПрО, выделенным в процессе моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мейтус В.Ю. Проблемы построения интеллектуальных систем. Уровни интеллекта. *Кибернетика и системный анализ*. 2018. Т. 54, № 4. С. 32–44.
2. Мейтус В.Ю. Проблемы построения интеллектуальных систем. Представление знаний. *Кибернетика и системный анализ*. 2019, Т. 55, № 4. С. 3–14.
3. Андон Ф.И., Яшунин А.Е., Резниченко В.А. Логические модели интеллектуальных информационных систем. Киев: Наукова думка, 1999. 396 с.
4. Мейтус В.Ю. Введение в теорию интеллектуальных систем. Основные представления. Саарбрюкен: Palmarium academic publishing, 2015. 189 с.
5. Letichevsky A. Theory of interaction, insertion modeling, and cognitive architectures. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. 2014. Vol. 8. P. 19–32.
6. Степашко В.С. Концептуальные основы интеллектуального моделирования. *Управляющие системы и машины*. 2016. № 4. С. 3–15.
7. Халмош П.Р. Николай Бурбаки. *Математическое просвещение (математика, ее преподавание, приложения и история)*. 1960. №5. С. 229–239.
8. Адамар Ж. Исследование психологии процесса изобретения в области математики. Москва: Советское радио, 1970. 152 с.
9. Rutten J.J.M.M. Universal coalgebra: A theory of systems. *Theoretical Computer Science*. 2000. Vol. 249. P. 3–80.
10. Hartonas C. An algebraic theory of structured objects. *Notre Dame Journal of Formal Logic*. 1977. Vol. 38, N 1. P. 65–80.
11. Milner R. A calculus of communicating systems. *Lecture Notes in Computer Science*. 1980. Vol. 92. 171 p.
12. Кон П. Универсальная алгебра. Москва: Мир, 1968. 351 с.
13. Goguen J.A. A categorical manifesto. *Mathematical Structures in Computer Science*. 1991. N 1(1). P. 49–67
14. Barr M., Wells C. Category theory for computing science. Prentice-Hall; Englewood Cliffs; New Jersey, 1990. 538 p.
15. Голдблатт Р. Топосы. Категорный анализ логики. Москва: Мир, 1983. 488 с.
16. Телеман К. Элементы топологии и дифференцируемые многообразия. Москва: Мир, 1967. 390 с.
17. Бишоп Р.Л., Криттенден Р. Геометрия многообразий. Москва: Мир, 1967. 335 с.
18. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. Москва: Изд. дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
19. Siddique N., Adeli H. Computational intelligence: Synergies of fuzzy logic, neural networks, and evolutionary computing. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2013. 517 p.
20. Глибовець М.М., Гулаева Н.М. Еволюційні алгоритми: підручник. Київ: НАУКМА, 2013. 828 с.
21. Мальцев А.И. Алгоритмы и рекурсивные функции. Москва: Наука, 1965. 392 с.
22. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта. Москва: Мир, 1991. 568 с.
23. Bezdek J.C. What is computational intelligence? *Computational Intelligence Imitating Life*. J. Zurada, B. Marks and C. Robinson (Eds.). IEEE Press, Piscataway, 1994. P.1–12.
24. Кочетков Ю.Ю. Вычислимые функции. URL: <http://kirill-andreyev.narod2.ru/olderfiles/1/Kochetkov.pdf>.
25. Колмогоров А.Н., Успенский В.А. К определению алгоритма. *Успехи математических наук*. 1958. Т.13, № 4. С.3–28.
26. Хофштадтер Д.Р. Гедель, Эшер, Бах: эта бесконечная гирлянда. Самара: Изд. дом «Бакра-М», 2001. 752 с.
27. Тейз А., Луи Ж., Снайерс Д., Водон П., Гоше П., Грегуар Э., Санчес Э., Дельсарт Ф. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию. Москва: Мир, 1990. 432 с.

28. Тейз А., Грибомон П., Юлен Г., Пирот А., Ролан Д., Снайерс Д., Воклер М., Гоше П., Вольпер П., Грегуар Э., Дельсарт Ф. Логический подход к искусственному интеллекту: от модальной логики к логике баз данных. Москва: Мир, 1998. 494 с.
29. Мальцев А.И. Алгебраические системы. Москва: Наука, 1970. 392 с.
30. Ивин А.А. Логика оценок и норм. Философские, методологические и прикладные аспекты. Москва: Проспект, 2016. 320 с.
31. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. Москва: Мир, 1976. 165 с.
32. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
33. Reiter R. A logic for default reasoning. *Artificial Intelligence*. 1980. Vol.13, N 1–2. P. 81–132.
34. Antoniou G. A tutorial on default logics. *ACM Computing Surveys*. 1999. Vol. 31, N 3. P. 337–359.

Надійшла до редакції 07.12.2020

В.Ю. Мейтус

**ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ.
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

Анотація. Досліджено і деталізовано процес інтелектуального моделювання предметних областей як складової дії інтелектуального суб'єкта, пов'язаних з розв'язанням завдань у цій галузі. Розглянуто побудову моделі предметної області як сукупності знань про окремі складові цієї області. Опис знань кожної складової містить логічне і онтологічне подання, ознаки цієї складової і її зв'язку з іншими елементами. Показано, що для опису предметної області як абстрактного представлення може бути використана відповідна математична структура. Розглянуто низку таких структур і різні варіанти логіки.

Ключові слова: інтелект, інтелектуальне моделювання, логіка, знання, математичні структури, представлення знань, алгоритм моделювання, онтологія.

V.Yu. Meitus

**PROBLEMS OF CONSTRUCTION OF INTELLIGENT SYSTEMS.
INTELLIGENT SIMULATION**

Abstract. The author analyzes in detail the process of intelligent simulation of subject areas. This process arises as a component of the actions of an intelligent subject associated with solving problems in this area. A subject domain model is built as a set of knowledge about the individual components of this domain. The description of knowledge of each component includes a logical and ontological representation, signs of this component, and its relationship with other elements. It is shown that a suitable mathematical framework can be used to describe the domain as an abstract representation. A number of such structures and various variants of logic are considered.

Keywords: intelligence, intelligent simulation, logic, knowledge, mathematical structures, knowledge representation, modeling algorithm, ontology.

Мейтус Володимир Юлійович,

доктор фіз.-мат. наук, провідний науковий співробітник, в.о. завідувача відділом Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН і МОН України, Київ,
e-mail: vmeitus@gmail.com.