

УПРАВЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

УДК 658.012.011.56

СОВРЕМЕННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ*

© 2000 г. В. Н. Захаров

Москва, Вычислительный центр РАН

Поступила в редакцию 30.05.98 г.

Обсуждаются основные направления современной технологии обработки информации, оказавшей существенное влияние на методы построения систем автоматического управления и приведшую к появлению нового научного направления – теории интеллектуальных управляющих систем. Рассматриваются особенности и перспективы использования шести важнейших направлений современной информационной технологии в структурах интеллектуальных систем управления. Приведены примеры.

Введение. Исследования в области создания эффективных систем управления, способных функционировать в условиях неопределенности входной информации (а также в тех случаях, когда не удается разработать формальную модель объекта управления или формальную модель процесса взаимодействия объекта с внешней средой) показали, что современная информационная технология внедрилась во многие разделы традиционной теории управления и привела к созданию новой научной дисциплины – теории интеллектуального управления. Понятие “новая информационная технология” было введено в обиход академиком Г.С. Поспеловым [1] много лет тому назад и сразу стало широко использоваться, когда речь заходила о создании новых систем обработки информации в рамках научного направления “искусственный интеллект”. Последний термин, напротив, с трудом пробивал себе дорогу в жизнь, поскольку определенно намекал на попытку создания технических систем, заменяющих человеческий мозг, хотя в свое время “отцы” искусственного интеллекта неоднократно подчеркивали недопустимость такого толкования.

Сегодня, благодаря многочисленным популярным и сугубо теоретическим публикациям в области искусственного интеллекта [2–9], это направление ни у кого не вызывает неверного толкования. Искусственный интеллект – это теоретическое направление, в рамках которого исследуются вопросы создания прикладных интеллектуальных систем, или, иначе, систем, ориентированных на обработку и использование знаний в той проблемной области, где решается данная задача. Другими словами, систем, поведение которых напоминало бы разумное поведение человека, а но-

вая информационная технология – это всего лишь средства достижения этих целей.

Изначально под “новой информационной технологией” подразумевались средства обработки информации, не связанные с алгоритмическими вычислениями, т.е. с вычислительным процессом, который основан на разработанном заранее алгоритме. Оставаясь в рамках этого не совсем точного определения постараемся уточнить, что же представляет современная информационная технология сегодня. С этой целью кратко охарактеризуем следующие шесть ее важнейших направлений, о которых можно говорить как о весьма перспективных на ближайшие годы. При этом подчеркнем, что нас будут интересовать только те направления, которые уже сегодня нашли широкое применение в практике построения систем автоматического управления.

1. Инженерия знаний и рассуждения на знаниях. Исследования в области искусственного интеллекта были инициированы выделением класса задач, для которых невозможно было заранее разработать вычислительный алгоритм. Когда появился класс задач, для которых не существовало алгоритма их решения, возникла единственная возможность организации вычислительного процесса, при котором знания использовались бы в процессе вычислений. Это привело к необходимости исследований в области хранения, пополнения знаний в памяти вычислительной машины, а также обработки и использованию знаний в процессе решения задачи. Как отмечал в своих работах в области ретроспективы нового научного направления “искусственный интеллект” Д.А. Поспелов [9], вскоре и этого оказалось мало. Возникла насущная необходимость привлечения средств логического вывода и далее механизмов приближенных и правдоподобных рассуждений как средств преодоления неопределенности, ис-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 99-01-00150а).

пользуемой в процессе решения задачи входной информации. Так появилось первое направление новой информационной технологии, которое может быть названо в «Инженерия знаний и рассуждения на знаниях». На этапе развития искусственного интеллекта под этим направлением и подразумевались исследования в области способов хранения, пополнения и обработки знаний и вывода на знаниях. Соответствующие прикладные программные системы получили название «интеллектуальных», или систем, ориентированных на обработку и использование знаний при решении невычислительных, или интеллектуальных задач. Тем не менее в недрах этого направления зрело поднаправление, которое сегодня разумно рассматривать как самостоятельное направление новой информационной технологии. Речь идет об обработке нечеткой информации.

2. Обработка нечеткой информации и нечеткий вывод. Выделение методов и средств обработки нечеткой информации [10–13] в отдельное направление современной информационной технологии оправдано тем, что эта технология является базой для построения всевозможных интеллектуальных программных систем, получивших название «нечетких систем» [14]. Обработка нечеткой информации и нечеткий вывод давно применяются в различных интеллектуальных системах, однако наиболее широкое распространение нечеткие системы получили в области управления. Приоритет в разработке нечетких управляющих систем принадлежит японским исследователям. В настоящее время известны более 400 разработок коммерческих нечетких систем управления [15], которые входят в класс управляющих систем, интеллектуальных «в малом». К настоящему времени разработаны общие принципы и основы методологии построения нечетких систем управления.

Общая схема обработки нечеткой информации выглядит следующим образом. Точные исходные данные с датчиков, контролирующего управляемый процесс, переводятся в значения лингвистических переменных в специальном блоке, получившем название «фазификатор». Далее реализуются процедуры нечеткого вывода на множестве продукционных правил, составляющих базу знаний системы управления, в результате чего формируются выходные лингвистические значения. Последние переводятся в точные значения результатов вычислений в специальном блоке, получившем название «дефазификатор». На выходе последнего формируются управляющие воздействия на исполнительные механизмы. Эта концептуальная схема лежит в основе так называемого нечеткого контроллера, используемого в интеллектуальных системах обработки неопределенной информации, в частности, в системах интеллектуального управления.

Несмотря на кажущуюся простоту и удобство этой схемы вычислений, получаемые результаты не всегда являются удовлетворительными. Главная причина состоит в том, что с помощью операций нечеткой алгебры не всегда удается построить эффективные вычислительные процедуры на множестве нечетких величин. Трудности возрастают с увеличением числа лингвистических переменных. Применение тех или иных операций нечеткой алгебры в ряде случаев зависит от используемых входных данных. Кроме того, операторы нечеткой алгебры недостаточно полно отражают смысл многозначных лингвистических преобразований термов лингвистических переменных [16]. Не всегда оправданы по смыслу используемые методы дефазификации и результаты выполнения соответствующих процедур. Отмеченные недостатки приводят к тому, что результатам обработки нечеткой информации часто ставится в соответствие лишь область подходящих значений, а не конкретные величины. Поэтому полученные результаты обработки нечеткой информации (так же как и используемые механизмы нечеткого вывода) подлежат дальнейшему уточнению на этапе моделирования.

3. Мягкие вычисления. С целью повышения точности результатов вычислений на базе методов обработки нечеткой информации в [17] была предложена концепция мягких вычислений (soft computing). Это предложение по существу сводилось к интегрированному использованию регуляторов на основе нечеткой логики (нечетких регуляторов), нейронных сетей и правдоподобных рассуждений. В [16] отмечается, что наиболее популярной схемой мягких вычислений в последнее время стала тройка <нечеткий регулятор, нейронная сеть, генетический алгоритм>. Генетические алгоритмы служат основой эволюционного моделирования, которое применяется для оптимизации базы правил и параметров нечеткого регулятора (в частности, уточнения результатов дефазификации).

4. Нейросетевая обработка информации и нейрокомпьютеры. Первые работы, относящиеся к моделированию искусственных нейронных сетей, появились более четырех десятков лет тому назад. Эти исследования представлялись весьма перспективными благодаря удивительным свойствам, присущим искусственным нейронным сетям, напоминающим работу мозга (способность к обобщению воспринимаемой информации, к извлечению существенных свойств из зашумленных данных, к обучению и самообучению на основе собственного опыта функционирования и т.п.). Однако вскоре наступила пора разочарований и затишья, возможно из-за недостаточно развитой в то время полупроводниковой технологии и переключения внимания исследователей на но-

вые модели и методы обработки и использования знаний.

После многих лет почти полного забвения интерес к методам нейросетевой обработки информации возник снова несколько лет тому назад, в частности, в связи с развитием микроэлектронной технологии и разработкой принципиально новых физических принципов реализации элементов и фрагментов нейронных сетей, в том числе сетей с очень большим числом нейронов. Это в свою очередь резко активизировало исследования в области нейроматематики (методов решения задач в нейросетевом базисе) и в области архитектур компьютеров нового типа – нейрокомпьютеров. Основное отличие нейрокомпьютеров от традиционных вычислительных машин состоит в том, что основой вычислений является не алгоритм в классическом его понимании и представлении (например, в виде граф-схемы алгоритма или в виде логической схемы алгоритма), а некий способ вычислений в нейросетевом логическом базисе, т.е. в виде нейронной сети определенной структуры определенной схемы настройки предварительной или в процессе решения задачи [18]. Именно эта особенность и позволяет рассматривать нейросетевую обработку информации в качестве отдельного направления современной информационной технологии. В теории управления эта технология используется для построения так называемых нейрорегуляторов, способных к самообучению и адаптации.

5. Эволюционное моделирование. Базой этого направления послужила теория эволюции Ч. Дарвина, основу которой составил так называемый естественный отбор. Предметом исследований эволюционных процессов служат механизмы генерации популяций (многочисленных совокупностей особей определенного вида) и выживаемости этих популяций в условиях агрессивной внешней среды. Согласно теории Дарвина, эволюция осуществляется при взаимодействии трех повторяющихся процессов [19]: отбора экземпляров популяции, амплификации (производство потомков) и мутации. Эти принципы использованы при разработке генетических алгоритмов, являющихся основой эволюционного моделирования технических систем [20–24].

Генетический алгоритм использует идею дарвиновской эволюции на основе принципа генерации, тестирования и отбора перспективных популяций. В этом случае воспроизводится хромосома в виде цепочки из n позиций. Каждая позиция хромосомы – ген, в частном случае принимающий значения из алфавита: $\langle 0, 1, * \rangle$. Следует отметить особенность генетического алгоритма, принципиально отличающие его от традиционных методов поиска оптимума: 1) в работе алгоритма используется кодирование множества параметров,

а не сами параметры; 2) поиск осуществляется на основе популяции точек, а не точек пространства поиска; 3) в алгоритме применяются вероятностные, а не детерминированные правила поиска [25].

Генетические алгоритмы – это, по формулировке [19], мощная стратегия выхода из локальных оптимумов. Она основана на параллельной обработке множества альтернативных решений, с концентрацией поиска на наиболее перспективных из них. В неперспективных решениях проводятся вероятностные изменения и такие решения снова подвергаются обработке. Более подробные сведения о работе генетических алгоритмов содержатся в обзорах [19, 26, 27].

6. Распределенный искусственный интеллект и многоагентные системы. Это наиболее позднее из сформировавшихся направлений современной информационной технологии. Некоторые авторы относят формирование этой дисциплины к началу 90-х годов. Одной из главных причин повышенного внимания исследователей к проблемам распределенного искусственного интеллекта и возникновения технологии многоагентных систем явилась необходимость распараллеливания поиска и обработки собранной информации в таких специфических хранилищах данных, какими является сеть Интернет. Само же понятие “интеллектуальный агент” появилось гораздо раньше в связи с исследованиями в области упрощения процесса взаимодействия неопытного пользователя с компьютером [28]. Близкие к этой области работы проводились в СССР в 60-х годах. К ним в основном относятся исследования в области коллективного поведения автоматов. Некоторые результаты этих исследований не потеряли своей актуальности и по сей день [29]. Сегодня многоагентные системы – бурно развивающееся направление исследований. Считается, что в грядущем тысячелетии это направление современной информационной технологии станет определяющим. По многоагентным системам проведено несколько международных конференций, на которых выделены на сегодня следующие прикладные области их использования: интеллектуальный поиск информации в сети Интернет, создание систем поддержки процессов проектирования и реинжиниринга бизнес-процессов, проектирование виртуальных предприятий, крупномасштабное планирование и составление расписаний. В области управления наиболее перспективной задачей является организация взаимодействия в коллективах интеллектуальных роботов.

7. Использование современной информационной технологии в системах управления. Итак, если под современной информационной технологией, используемой в системах автоматического управления, подразумевать средства обработки информации при решении управленческих задач,

для которых трудно или невозможно использовать разработанную заранее и неизменяемую в процессе расчетов схему вычислений (вычислительный алгоритм), то сегодня все эти средства могут быть расклассифицированы по приведенным выше шести направлениям. Заметим, что технологические средства выделенных отдельных направлений могут использоваться как самостоятельно, так и в сочетании со средствами других направлений.

Современная информационная технология сегодня стала основным инструментальным средством, используемым при создании систем интеллектуального управления, разрабатываемых в рамках теории, появившейся в последние годы на стыке двух теоретических дисциплин – традиционной теории автоматического управления и теории искусственного интеллекта. Под системами интеллектуального управления подразумеваются системы, в контуре управления которых при формировании управляющих воздействий используются устройства обработки информации, построенные с использованием имеющихся на сегодняшний день средств современной информационной технологии, включающей какие-либо средства из упомянутых шести важнейших направлений. Интеллектуальные системы управления характеризуются многоуровневой архитектурой, на нижних уровнях иерархии которой используются формальные модели традиционной теории автоматического управления. Управляющие структуры систем такого класса строятся в соответствии с принципом: “более высокому уровню в иерархической структуре соответствует более высокая степень интеллектуальности и наоборот” [15]. Поскольку понятие “интеллектуальность” в общепринятом смысле является неформализуемым, обычно под “интеллектуальностью системы” подразумевается способность системы работать с базой внешних событий (ситуаций), а под степенью интеллектуальности – степень развитости используемых средств преодоления неопределенности используемой информации и знаний закономерностей проблемной среды или внешнего мира, в котором функционирует данная управляющая система. Поэтому нижний уровень иерархической структуры (уровень формальных моделей), называемый в теории интеллектуального управления исполнительным, относится к уровню с нулевой степенью интеллектуальности, а вся обработка неполной и неопределенной информации, связанной с анализом внешних и внутренних ситуаций, осуществляется на более высоких уровнях с использованием таких средств, как логический вывод, правдоподобные рассуждения, обучение и т.п.

Основные направления современной информационной технологии используются при решении следующих задач. Первое направление (обра-

ботка знаний и рассуждения на знаниях) активно используется при создании интеллектуальных систем управления на базе экспертных систем, включенных в их архитектуру на высших уровнях иерархии. Второе направление (обработка нечеткой информации и нечеткий вывод) активно используется при создании нечетких систем управления [14]. Третье направление (мягкие вычисления) используется при разработке самообучающихся нечетких систем. Четвертое направление (нейросетевая обработка информации) также используется при создании самообучающихся нейросетевых регуляторов. Методы эволюционного моделирования (пятое направление) применяются при настройке нейронных регуляторов и поиске функций принадлежности в нечетких системах управления. Наконец шестое направление (многоагентные системы) используется при создании распределенных интеллектуальных (в частности, робототехнических) управляющих систем.

Перейдем к анализу примеров структур интеллектуальных управляющих систем.

8. Интеллектуальные системы управления на базе экспертных систем. При разработке систем такого класса используются, главным образом, средства первого направления. В зависимости от вида используемых моделей на нижнем (исполнительном) уровне, интеллектуальные системы управления делятся на два класса: интеллектуальные системы логического управления и интеллектуальные регуляторы. В системах первого класса на исполнительном уровне используются логические модели (например, автоматные), а в системах второго класса – модели традиционной теории автоматического управления (регулирования). Интеллектуальные системы логического управления, использующие в своем составе экспертную систему, в соответствии с определением 1 из [15] относятся к классу управляющих систем, обладающих свойством “интеллектуальности в большом”, если в системе используются механизмы прогноза изменений внешнего мира, в котором функционирует система, и собственного поведения в нем. Прообразом этих систем в недавнем прошлом служили системы ситуационного управления, разработка которых в нашей стране в шестидесятых – семидесятых годах осуществлялась под руководством Д.А. Поспелова [30].

Задолго до появления развитых программных систем, ориентированных на представление и обработку знаний, в системах ситуационного управления при поиске управленческих решений использовались знания об особенностях принятия решения управленцем-оператором, т.е. специалистом в той области управления, для которой разрабатывалась данная система ситуационного управления (в частности, для решения прикладной задачи оперативного управления речным пор-

том). Другой важной особенностью ситуационного управления является принятие управленческих решений на множестве ситуаций (событий), возникающих в процессе управления. Эти две особенности подтверждаются следующими двумя определениями, приведенными в [31] и не потерявшими своего значения для современных интеллектуальных управляющих систем.

Определение 1. Под текущей ситуацией на объекте управления подразумевается совокупность всех сведений о структуре объекта управления и его функционировании в данный момент времени.

Определение 2. Под полной ситуацией подразумевается совокупность, состоящая из текущей ситуации, знаний о состоянии системы управления в данный момент времени и знаний о технологии управления.

Эти определения свидетельствуют о том, что в системах ситуационного управления использовались знания при принятии управленческих решений и формировании управляющих воздействий, что является отличительной особенностью интеллектуальных управляющих систем. Напомним к тому же (об этом говорилось в предыдущем разделе), что в теории интеллектуальных систем управления под интеллектуальностью (см. [15]) подразумевается именно способность системы работать с базой внешних событий (ситуаций), возникающих в процессе управления. Поэтому

системы ситуационного управления действительно были прообразом современных интеллектуальных управляющих систем.

Основой метода ситуационного управления служит следующее положение: множеству всех возможных полных ситуаций (по меньшей мере, счетному) соответствует конечное множество принимаемых решений с весьма небольшой мощностью. В качестве примера можно привести задачу управления автомобилем. Число возможных дорожных ситуаций велико, а число принимаемых решений по управлению крайне ограничено (ускорение, торможение, поворот руля влево и вправо). Поэтому, если множество полных ситуаций разбить на подмножества, каждому из которых можно поставить в соответствие единственное типовое решение, то задача управления сведется лишь к классификации поступающих на вход системы внешних ситуаций. Эта идея и реализуется в системах ситуационного управления, для чего был разработан специальный язык представления и обработки описаний полных ситуаций.

Классическая структурная схема системы ситуационного управления семидесятых годов приведена в [31, 32] и выглядит следующим образом (см. рис. 1). Два блока “Кодировщик” и “Декодировщик” составляют основу интерфейса системы ситуационного управления с объектом управления (по терминологии семидесятых годов – “устройства связи с объектом”) [33]. Кодировщик переводит информацию о ситуации, сложившейся на объекте управления, в специальное внутреннее представление, удобное для анализа в блоке “Анализатор”. Декодировщик выполняет обратное преобразование.

Основной функцией блока “Анализатор” является выяснение обстоятельства, принадлежит ли поступившая на вход системы ситуация множеству критических ситуаций, т.е. тех, по которым необходимо принимать решения. Если да, то описание данной ситуации поступает в следующий блок “Классификатор”. Если нет, то описание ситуации передается в блок “База знаний”, где собирается вся информация об особенностях функционирования объекта управления и принимаемых решениях.

В блоке “Классификатор” в виде продукционных правил хранится информация о классах типовых ситуаций, каждому из которых соответствует определенное стандартное решение по управлению. Первоочередной задачей этого блока является определение того типового класса, к которому относится данная ситуация. Если эта задача решена, то можно приступать к формированию решения по управлению. Информация об этом, пройдя блок “Коррелятор”, поступает в блок “Решатель”, где и реализуется процесс принятия ре-

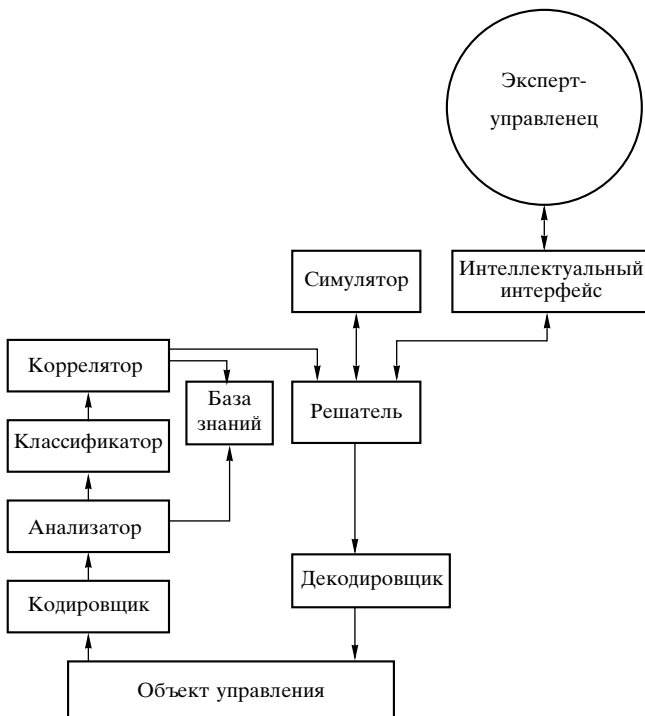


Рис. 1. Классическая схема ситуационного управления.

шения. Если же ситуация может быть отнесена одновременно к нескольким классам (возможно с разными показателями принадлежности), конфликт разрешается в блоке “Коррелятор”, где содержится достаточно общие эвристические правила. В этом блоке определяется единственное правило, которое применимо к данной ситуации, и эта информация опять же передается в блок “Решатель”.

Возможны случаи, когда входная ситуация является не только нетиповой, но и полностью неизвестной системе. В таких случаях ни “Классификатор”, ни “Коррелятор” не могут выполнить свои функции. Информация о невозможности использовать имеющиеся в системе знания передается в блок “Решатель”, который может попытаться подобрать решение, используя функции прогноза и регноза, реализуемые в блоке “Симулятор”. Если же и это оказывается невыполнимым, “Решатель” через блок “Интеллектуальный интерфейс” обращается за помощью к человеку-эксперту. Рекомендованное последним решение поступает в блок “Решатель”, записывается в Базу знаний и является в дальнейшем исходной информацией для возможной коррекции продукционных правил в блоках “Анализатор”, “Классификатор” и “Коррелятор”. Сформированное или полученное от эксперта решение преобразуется в “Решателе” в управляющую программу и передается через блок “Декодировщик” на объект управления.

Как следует из приведенного описания работы системы ситуационного управления, процессы принятия управленческих решений аналогичны процессам обработки информации в любой интеллектуальной (в частности, экспертной) системе. Типовая структура экспертной системы может быть представлена следующими блоками [34]: база знаний с механизмами рассуждений, интеллектуальный решатель, интеллектуальный планировщик, подсистема объяснения и интеллектуальный интерфейс с пользователем (см. рис. 2). Экспертные системы могут существенно образом различаться по архитектуре и выполняемым функциям, но в них всегда в той или иной мере присутствуют указанные блоки. При этом наиболее сложные функции по принятию решений на базе механизмов рассуждений с использованием информации из базы знаний реализуются в блоке “Интеллектуальный решатель”. Теоретическим проблемам построения интеллектуальных решателей и особенностями их работы посвящена монография [35].

В экспертных системах, непосредственно включенных в контур управления, блок интерфейса с пользователем естественным образом заменяется на блок интерфейса с объектом управления.

В монографии [31] подведены итоги исследований в области разработки теории и создания прикладных систем ситуационного управления. Там же отмечается влияние на развитие ситуационного управления исследований в области искусственного интеллекта, в частности, в той подобласти, которая впоследствии стала называться “инженерией знаний”. Таким образом, ситуационное управление на десятки лет предопределило появление инженерии знаний своими исследованиями и разработками моделей представления и обработки знаний.

Как отмечается в [31] ситуационное управление сыграло роль катализатора в процессе разработки новых идей и принципов построения моделей реального мира и деятельности человека, давших толчок новым исследованиям в области искусственного интеллекта [31]. В своей работе по ситуационному управлению [32] Д.А. Поспелов обозначил наметившийся переход от систем ситуационного управления к системам интеллектуального управления, строящимся на базе использования в своих структурах экспертных систем. Общая архитектура таких систем, приведенная в [32], имеет следующий вид (см. рис. 3). Как видно из рисунка, архитектура включает в себя пять основных блоков. Блок “Интеллектуальный интерфейс” служит для связи с экспертом в области управления и используется в основном для обучения системы. Блок “Экспертная система” может быть представлен архитектурой, указанной на рис. 2. Блок “Симулятор” осуществляет моделирование развития текущей ситуации (прогноз) и в некоторых случаях может выполнять функции анализа путей развития процессов, приведших к текущей ситуации (регноз).

Рассмотренная архитектура может служить основой для построения многоуровневых структур логического управления. При этом функции

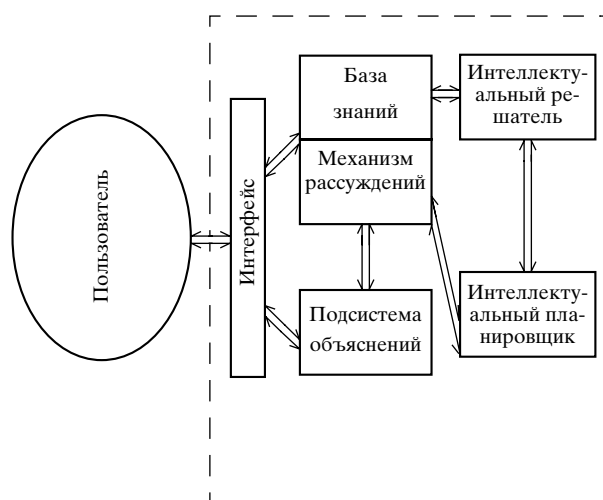


Рис. 2. Типовая структура экспертной системы.



Рис. 3. Концептуальная архитектура интеллектуальной системы логического управления.

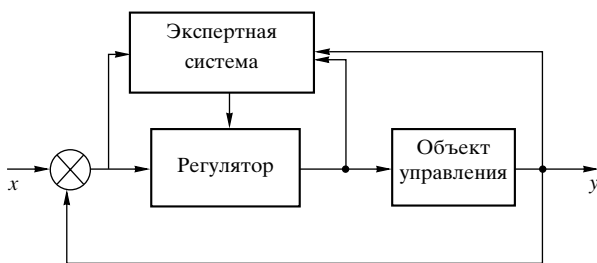


Рис. 4. Упрощенная структура экспертного регулятора.

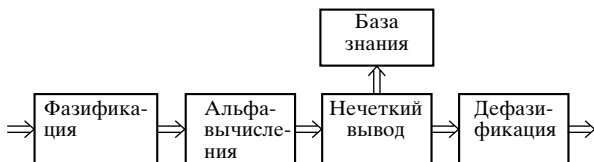


Рис. 5. Структура КСОНИ (концептуальной схемы обработки нечеткой информации).

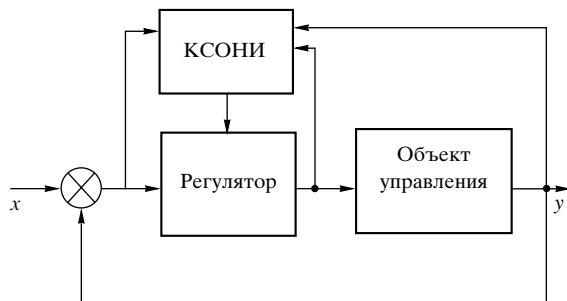


Рис. 6. Пример упрощенной структуры нечеткого регулятора.

исполнительного уровня будут реализованы в блоке “Выходной интерфейс”. Как уже отмечалось в начале этого раздела, управляющая система на базе экспертной системы, снабженная механизмами обучения и прогноза развития текущих ситуаций, удовлетворяет всем пяти принципам организации интеллектуальных управляющих систем и, следовательно, относится к системам управления, обладающим свойством “интеллектуальности в большом”.

Проблемам создания интеллектуальных систем управления на базе экспертных регуляторов с использованием технологии инженерии знаний и рассуждений на знаниях (технологии экспертных систем) посвящена работа [36]. В [37] приведена предложенная авторами упрощенная структура экспертного регулятора (см. рис. 4). Кроме основного контура управления (регулятор – объект управления) структура содержит так называемую интеллектуальную обратную связь с включенной в нее упрощенной экспертной системой. Упрощение касается ориентации экспертной системы на решение управленческих задач, а также отсутствия некоторых специфических блоков, присущих программным экспертным системам более широкого класса (например, подсистемы объяснения). С помощью экспертной системы осуществляется автоматическое управление коэффициентами регулятора в зависимости от изменений характеристик окружающей среды (в которой функционирует динамическая система) и самого объекта управления.

Ключевой проблемой при реализации функций экспертного регулятора является формирование базы знаний экспертной системы, получаемых в результате анализа динамических свойств системы в условиях изменения внешней среды и характеристик объекта управления. Формирование базы знаний и организация эффективных механизмов вывода характерны при разработке любой экспертной системы. Однако для экспертного регулятора проблема осложняется необходимостью учета ряда специфических требований [37]: высокое быстродействие и эффективность поиска решений, удовлетворяющих целям управления; высокая надежность (способность обеспечивать эффективное функционирование системы управления в условиях неполностью определенной входной информации); гибкость (способность к подключению различных механизмов вывода на соответствующих фрагментах знаний) и, наконец, компактность (малые массогабаритные характеристики устройств, реализующих функции экспертной системы). В [37] приведена подробная методика организации базы знаний экспертной системы и синтеза структуры экспертного регулятора. Сообщается также о том, что на базе рассмотренной методики разработан экспертный регулятор электропривода робота, являющийся до-

статочно сложным примером интеллектуальной системы автоматического управления. Высказывается уверенность в том, что созданный экспертный регулятор пригоден для управления и другими динамическими объектами.

9. Нечеткие системы управления. Это на сегодняшний день самый распространенный класс прикладных интеллектуальных управляющих систем, который в соответствии с определением 2 из [15] является классом управляющих систем, обладающих свойством “интеллектуальности в малом”.

Формирование управляющих воздействий в системах этого класса производится на основе процедур обработки нечетких данных.

В любой модели преобразования нечеткой информации в той или иной форме присутствуют следующие три процедуры [38]: преобразование текущих значений входных переменных в значения лингвистических переменных; нечеткий вывод значений выходных лингвистических переменных; преобразование выведенных значений выходных лингвистических переменных в четкие значения выходных переменных. Эти три процедуры, описанные в п. 2 настоящей статьи, совместно с процедурой “Альфа-вычислений” [12], составляют так называемую концептуальную схему обработки нечеткой информации (КСОНИ), приведенную в [39] и имеющую вид, представленный на рис. 5. Если система управления в контуре обратной связи содержит блок КСОНИ, то она относится к классу нечетких управляющих систем. Например, структура нечеткого регулятора (рис. 6) может быть получена путем замены на рис. 4 блока “Экспертная система” блоком КСОНИ. Если на рис. 3 блок “Экспертная система” заменить блоком КСОНИ и убрать все вышерасположенные блоки, то получим структуру нечеткой системы логического управления. Вопросам разработки конкретных структур систем нечеткого управления посвящены работы [13, 14, 17, 25, 34, 38, 39].

Заключение. В данной работе выделены и кратко охарактеризованы шесть направлений современной информационной технологии, оказавших и продолжающих оказывать большое влияние на развитие науки и практики построения всевозможных интеллектуальных систем. Приведенные на рисунках примеры структур систем интеллектуального управления касаются, в основном, первых двух направлений. В случае экспертных систем мы имеем дело со структурами самой большой сложности, как правило, с многоуровневыми структурами, отвечающими принципам [15]. В случае нечетких систем, напротив, структуры наиболее простые. Получается, что мы как бы очертили границы сложности систем интеллектуального управления. Структуры промежуточной сложности строятся с использо-

ванием оставшихся четырех направлений современной информационной технологии: мягких вычислений, нейросетевой обработки информации и т.д. Некоторые сведения об этих системах изложены [25, 34]. Анализ результатов исследований в области современной информационной технологии [40] позволяет с известной степенью уверенности прогнозировать в ближайшие годы широкое использование ее основных направлений во многих областях науки и техники. Наиболее перспективными в ближайшие годы могут оказаться исследования в области комбинированных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Поспелов Г.С.* Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. М.: Наука, 1988.
2. *Нильсон Н.* Искусственный интеллект. Методы поиска решений. М.: Мир, 1973.
3. *Слэйгл Дж.* Искусственный интеллект. Подход на основе эвристического программирования. М.: Мир, 1973.
4. *Попов Э.В., Фирдман Г.Р.* Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта. М.: Наука, 1976.
5. *Хант Э.* Искусственный интеллект. М.: Мир, 1978.
6. *Уинстон П.* Искусственный интеллект. М.: Мир, 1980.
7. *Поспелов Д.А.* Фантазия или наука: на пути к искусственному интеллекту. М.: Наука, 1982.
8. *Эндрю А.* Искусственный интеллект. М.: Мир, 1985.
9. Будущее искусственного интеллекта / Под ред. К.Е. Левитина и Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1991.
10. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // *Information and control*. 1965. V. 8. № 3.
11. *Zadeh L.A.* Fuzzy algorithms // *Information and control*. 1968. V. 12. № 2.
12. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986.
13. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989.
14. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. Пер. с японского. М.: Мир, 1993.
15. *Zakharov V.N.* Intelligent control systems: Principal concepts and definitions // *Journal of computer and systems sciences international*. 1997. V. 36. № 3.
16. *Тарасов В.Б.* От искусственного интеллекта к искусственной жизни: новые направления в науках об искусственном // *Новости искусственного интеллекта*. 1995. № 4.
17. *Zadeh L.A.* Fuzzy logic, neural network and soft computing // *Communication of the ACM*. 1994. V. 37. № 3.
18. *Галушкин А.И.* О работах по нейрокомпьютерам в Научном центре нейрокомпьютеров Российской

- Академии наук // Новости искусственного интеллекта. 1992. № 4.
19. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Обзор и состояние // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 3.
 20. Fraser A.S. Simulation of genetic systems // Journal of Theoretical Biology. 1962. V. 2.
 21. Fraser A.S. The evolution of purposive behavior / In Purposive Systems, H. von Foerster, J.D. White, L.J. Peterson, and J.K. Russel, Eds. Washington, DC: Spartan Books, 1968.
 22. Bremermann H.J., Rogson M., Salaff S. Search by Evolution / In Biophysics and Cybernetic Systems. M. Maxfield, A. Callahan, L.J. Fogel, Eds. Washington DC: Spartan Books, 1965.
 23. Bremermann H.J., Rogson M., Salaff S. Global Properties of Evolution Processes / In Natural Automata and Useful Simulations. H. Pattee, E.A. Edisack, L. Fein, A.B. Callahan, Eds. Washington DC: Spartan Books, 1966.
 24. Reed J., Toombs R., Barricelli N.A. Simulation of biological evolution and machine learning // Journal of Theoretical Biology. 1967. V. 17.
 25. Захаров В.Н., Ульянов С.В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. IV. Имитационное моделирование // Изв. РАН. Техн. кибернетика. 1994. № 5.
 26. Скурихин А.Н. Генетические алгоритмы // Новости искусственного интеллекта. 1995. № 4.
 27. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Состояние. Проблемы. Перспективы // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1999. № 1.
 28. Городецкий В.И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения // Новости искусственного интеллекта. 1996. № 1.
 29. Стефанюк В.Л. От автоматов М.Л. Цетлина к искусственному интеллекту (этапы и вехи, или как это было) // Новости искусственного интеллекта. 1995. № 4.
 30. Поспелов Д.А. Принципы ситуационного управления // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1971. № 2.
 31. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика. М.: Наука, 1986.
 32. Поспелов Д.А. Ситуационное управление – новый виток развития // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1995. № 5.
 33. Захаров В.Н., Поспелов Д.А., Хазацкий В.Е. Системы управления. Задание. Проектирование. Реализация. М.: “Энергия”, 1972.
 34. Zakharov V.N., Ulyanov S.V. Fuzzy models of intelligent industrial controllers and control systems. II. Evolution and principles of design // Journal of computer and systems sciences international. 1995. V. 33. № 2.
 35. Ефимов Е.И. Решатели интеллектуальных задач. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.
 36. Лебедев Г.Н., Лохин В.М., Мадыгулов Р.У. и др. Развитие технологии экспертных систем для управления интеллектуальными роботами // Изв. РАН. Техн. кибернетика. 1994. № 6.
 37. Лохин В.М., Мадыгулов Р.У., Макаров И.М. и др. Применение экспертных регуляторов для систем управления динамическими объектами // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1995. № 1.
 38. Кудинов Ю.И. Нечеткие модели вывода в экспертных системах // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. № 5.
 39. Аверкин А.Н., Головина Е.Ю., Сергиевский А.Е. Проектирование нечетких регуляторов на основе треугольных норм // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. № 5.
 40. Поспелов Д.А. Новые информационные технологии – это те ключи, которые откроют нам путь в новое общество // Новости искусственного интеллекта. 1994. № 2.