

## От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению. II\*

С.Н. Васильев

В настоящее время довольно сильно продвинутом в области интеллектуального управления является применение производственных систем в форме нечетких и других правил, а также искусственных нейронных сетей. В работе на примере систем, основанных на нечетких правилах, рассматриваются некоторые результаты их применения в задачах интеллектуального управления в технике. Обсуждаются логический подход в теории управления и проблема повышения уровня интеллекта в сложных системах управления.

### Введение

Как мы заключили в предыдущей статье [1], производственные системы (в форме нечетких и других правил) и искусственные нейронные сети сегодня нашли довольно широкое применение в области интеллектуального управления. В отличие от нейронных сетей, обладающих существенно более высокой производительностью и весьма эффективных прежде всего в задачах типа распознавания образов, системы, основанные на правилах, не обладают свойством массового параллелизма, но также применимы в задачах управления в реальном времени и, что более важно, позволяют в принципе уже сегодня моделировать интеллектуальные процессы более высокого уровня.

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 98-01-01137, 98-07-90314 и Федеральной целевой программы «Интеграция».

В п.п. 1, 2 на примере систем обработки знаний, основанных на нечетких и других правилах, рассматриваются некоторые результаты их применения в задачах интеллектуального управления в технике. п.п. 3-5 обсуждаются возможности и проблемы повышения уровня интеллекта систем управления, в том числе путем дальнейшего развития и интегрирования средств логического вывода. Дается сравнение систем управления с точки зрения возрастания потенциала решения задач автоматического управления.

## 1. Интеллектуальное управление на основе нечетких и других правил

Разработка систем интеллектуального управления (СИУ) классов 1 [1], то есть основанных на правилах, предполагает выбор определенных состояний и выхода, в терминах которых и формулируются правила. В самом простейшем случае – интеллектуальных аналогов широко распространенных в теории автоматического управления способов формирования управления – этот выбор можно реализовать в соответствии с позиционным управлением по положению и скорости объекта управления (ОУ), именно в соответствии с принципами пропорционального (П) пропорционально-дифференциального (ПД) управления. Разумеется, могут использоваться аналоги и других типовых способов формирования управления, например, пропорционально-интегрального (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) или пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) управления. Для нелинейных систем управления способы формирования управления могут получаться и более сложными.

Рассмотрим структурную схему простейшей следящей системы (рис. 1).

Назначение регулятора – удерживать для любого момента времени достаточно близким значение сигнала  $y$  (на выходе объекта управления) к значению уставки, то есть входного сигнала  $y_{вх}$ . Иными словами, необходимо в условиях действия возмущения  $f$  обеспечивать достаточную малость ошибки (рассогласования)  $e = y_{вх} - y$ . Показатели ошибки  $e$ , используемые в посылках правил, аналогич-

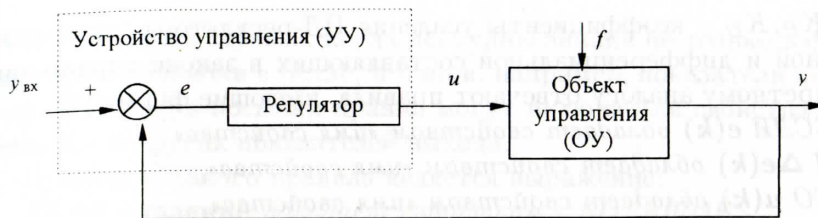


Рис. 1. Структурная схема простейшей следящей системы.

ных ПИД-управлению, обычно выбираются из числа следующих трех [2]:

- ошибка  $e$ ,
- изменение ошибки, обозначаемое  $\Delta e$  или  $\dot{e}$ ,
- сумма ошибок  $\delta e$ .

Показатели управления  $u$  на выходе устройства управления (УУ), то есть на входе в процесс, используемые в заключениях правил, обычно выбираются из числа следующих:

- изменение управления, обозначаемое  $\Delta u$  или  $\dot{u}$ ,
- управление  $u$ .

Кроме того, в случае дискретного времени  $k = 1, 2, \dots$ , по аналогии с обычным регулятором, мы имеем

$$e(k) = y_{вх} - y(k),$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1),$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1),$$

$$\delta e(k) = \sum_{i=1}^{k-1} e(i),$$

где  $y_{вх}$  – желаемый выход процесса,  $y$  – текущий выход.

Уравнение обычного ПД-регулятора имеет вид

$$u = K_P e + K_D \dot{e},$$

где  $K_P, K_D$  – коэффициенты усиления ПД-регулятора (пропорциональной и дифференциальной составляющих в законе управления). Дискретному аналогу отвечают правила, имеющие форму [2]:

*ЕСЛИ  $e(k)$  обладает свойством «имя свойства»*

*И  $\Delta e(k)$  обладает свойством «имя свойства»,*

*ТО  $u(k)$  обладает свойством «имя свойства»,*

где <имя свойства> – предикатный символ, например, РАВНО НУЛЮ, ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ МАЛОЕ, ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ СРЕДНЕЕ, ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ БОЛЬШОЕ, ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ МАЛОЕ, ... Смысл этих правил очевиден.

Если уравнение обычного ПИ-регулятора

$$u = K_P e + K_I \int edt,$$

где  $K_I$  – коэффициент усиления интегрального члена в законе управления, преобразовать в эквивалентную форму

$$\dot{u} = K_P \dot{e} + K_I e,$$

то предыдущая форма правил (дискретного аналога) сохраняется. В этом случае для получения значения управления  $u(k)$  изменение управления  $\Delta u(k)$  суммируется с  $u(k-1)$ .

Форма представления правил дискретного ПИ-регулятора имеет вид:

*ЕСЛИ  $e(k)$  обладает свойством «имя свойства»,*

*ТО  $u(k)$  обладает свойством «имя свойства».*

Уравнению обычного ПИД-регулятора

$$u = K_P e + K_D \dot{e} + K_I \int edt$$

отвечают правила следующей формы:

*ЕСЛИ  $e$  обладает свойством «имя свойства»*

*И  $\Delta e$  обладает свойством «имя свойства»*

*И  $\delta e$  обладает свойством «имя свойства»,*

*ТО  $u$  обладает свойством «имя свойства».*

В некоторых случаях, когда доступны знания не только в форме показателей ошибки  $e$  ( $e, \Delta e, \delta e$ ), но и, например, показатели выхода  $y$  процесса, то в посылки правил могут включаться свойства переменной  $y$  и других показателей выхода.

Примером такого правила является выражение:

*ЕСЛИ давление обладает свойством <БОЛЬШОЕ>*

*И изменение давления обладает свойством <ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ МАЛОЕ>,*

*ТО подвод-отвод энергии обладает свойством <ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ СРЕДНЕЕ>,*

где **давление** – выход  $y$  процесса, а **подвод-отвод энергии** – управление.

Если в правилах имена свойств рассматривать как предикатные символы, то возможна формализация этих правил в предикатной форме (а именно в стиле хорновских формул, образующих подмножество формул первого порядка исчисления предикатов, см. п. 6 [1]) с выходом на методы обработки знаний в духе автоматического доказательства теорем или логического программирования. Такое чисто символическое представление правил достаточно и для некоторого качественного анализа вопросов устойчивости системы управления. Разумеется, в составе УУ должны быть представлены преобразователи входов УУ (аналоговых или цифровых) в двоичные, то есть истинностные значения предикатов (истина – ложь), и обратно – двоичных входов в обычные, приемлемые для ОУ величины (сигналы).

Если же эти имена свойств рассматривать как нечеткие значения лингвистических переменных в смысле [3], то соответствующие правила являются нечеткими, а в составе УУ предусматриваются фазификатор, преобразующий обычные (четкие, аналоговые или цифровые) значения входов УУ в нечеткие (лингвистические) значения, и дефазификатор для обратного преобразования нечетких значений выходных переменных УУ в приемлемые для ОУ величины (сигналы). Помимо того же качественного анализа, что и выше, путем количественной интерпретации содержательного смысла нечетких значений лингвистических переменных в терминах нечетких множеств или функций принадлежности [3] можно обеспечить и количе-

ственное описание поведения системы управления [2].

Основными задачами, решаемыми при создании СИУ с нечеткой логикой, являются сопоставление описаний состояний ОУ с условиями истинности продукционных правил, а также определение стратегии (порядка) использования правил.

В зависимости от того, как решается вторая задача, предлагается [4] различать два типа формирования управления: «ситуация-действие» (С-Д) и «ситуация-стратегия управления-действие» (С-СУ-Д). В случае С-Д правила задаются в явной форме, то есть как высказывания, образуя базу знаний. На очередном шаге используется правило, условия истинности которого наиболее соответствуют в смысле некоей меры близости состоянию ОУ. Стратегия просмотра, как правило, неизменна.

В случае С-СУ-Д явно заданных правил нет. Они выводятся, базируясь на некоторой нечеткой ситуационной сети, как нечетком взвешенном графе переходов внутри множества эталонных описаний состояний ОУ [4]. Набор правил, необходимых для вывода управляющего действия, а также порядок их применения определяются стратегией управления – нечетким маршрутом в сети от исходной к целевой ситуации. Формирование управления в случае С-СУ-Д обладает большей гибкостью и устойчивостью к нештатным условиям управления.

Заметим, что значения переменных, которые входят в правила, имеющие формы, представленные выше в качестве интеллектуальных аналогов классических регуляторов, динамически меняются. Например, значение  $\delta$  зависит от всей предыстории. Сами же правила в нормальном режиме эксплуатации СИУ не предполагается менять. В этом смысле можно считать СИУ, основанную на правилах указанных форм, *статической*.

Исторически нечеткое управление использовалось вначале в контексте именно статических правил. Позднее были созданы адаптивные нечеткие регуляторы либо в неявной форме [5], в которых использовалась промежуточная модель процесса для «перепроектирования» (синтеза) регулятора в реальном времени (см. рис. 2), либо в более привычной форме прямой адаптации, когда по результатам наблюдения функционирования контура управления модифицирует-

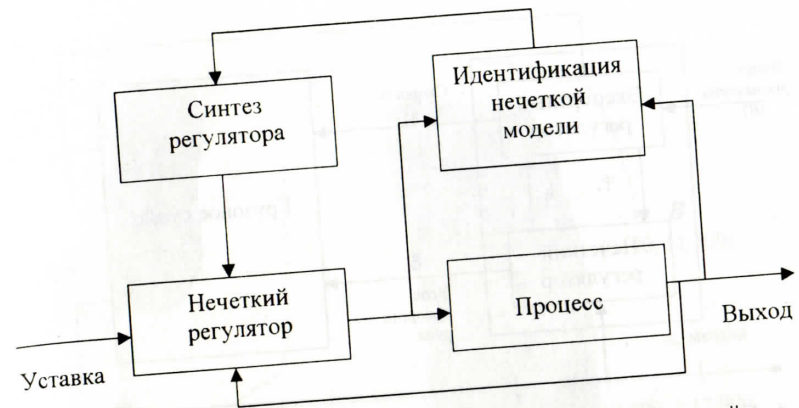


Рис. 2. Нечеткий регулятор с неявной адаптацией.

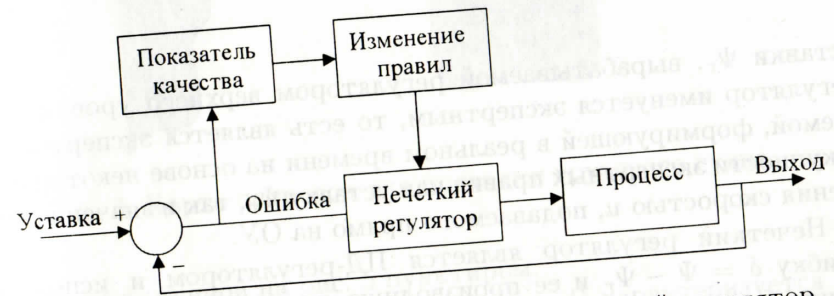


Рис. 3. Типовой самоорганизующийся нечеткий регулятор.

ся прямо база правил (рис. 3). В общем случае, последние регуляторы именуется *самоорганизующимися*, основанными на нечеткой логике [6].

Пример СИУ для проводки грузового судна между островами без вмешательства человека описан в [7]. Входами в процесс (ОУ) являются  $u$  (скорость) и  $\delta$  (угол поворота руля), выходами – курс судна  $\Psi$  (относительно осей фиксированной системы координат) и положение в плоскости  $(x, y)$ . Структура системы управления является двухуровневой и представлена на рис. 4.

Нечеткий регулятор нижнего уровня должен обеспечивать для любого момента времени достаточную близость курса  $\Psi$  к значению

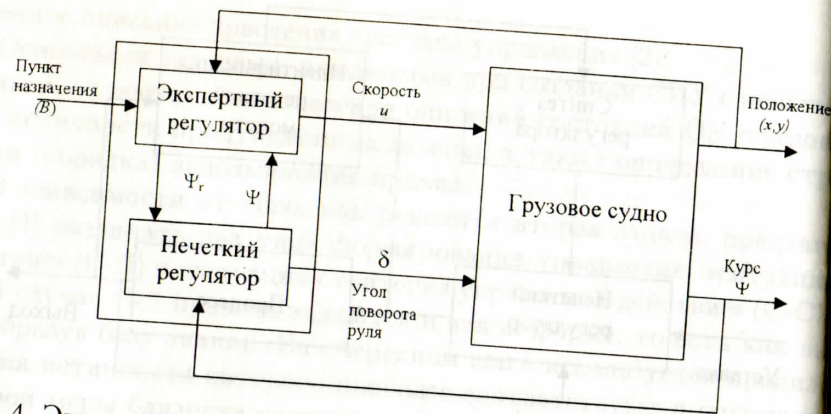


Рис. 4. Экспертно-нечеткий регулятор для проводки грузового судна.

уставки  $\Psi_r$ , вырабатываемой регулятором верхнего уровня. Этот регулятор именуется экспертным, то есть является экспертной системой, формирующей в реальном времени на основе некоторой совокупности экспертных правил как уставку  $\Psi_r$ , так и значение управления скоростью  $u$ , подаваемого прямо на ОУ.

Нечеткий регулятор является ПД-регулятором и использует ошибку  $\delta = \Psi - \Psi_r$  и ее производную для выбора значения управления  $\delta$  углом поворота рулей. Экспертный регулятор использует курс  $\Psi$ , текущую позицию  $(x, y)$  и знание пункта назначения  $(B)$  для определения, с какой скоростью двигаться и какой курс  $\Psi_r$  задать нечеткому регулятору.

Экспертный регулятор разработан в духе работы [8]. Он использует некоторую систему приоритетов для правил, управляющую процессом вывода. Регулятор отыскивает курс и скорость, основываясь на положении островов, обеспечивая подходящее маневрирование между ними в стиле опытного капитана. Например, для задачи перевода судна из точки  $A$  в точку  $B$ , представленной на рис. 5 оказывается достаточным всего лишь 10 правил для представления опыта капитана. В общем случае эти правила характеризуют желание замедлить судно на поворотах, ускорить на прямых участках и порождают управления, обеспечивающие судну отслеживание траек-

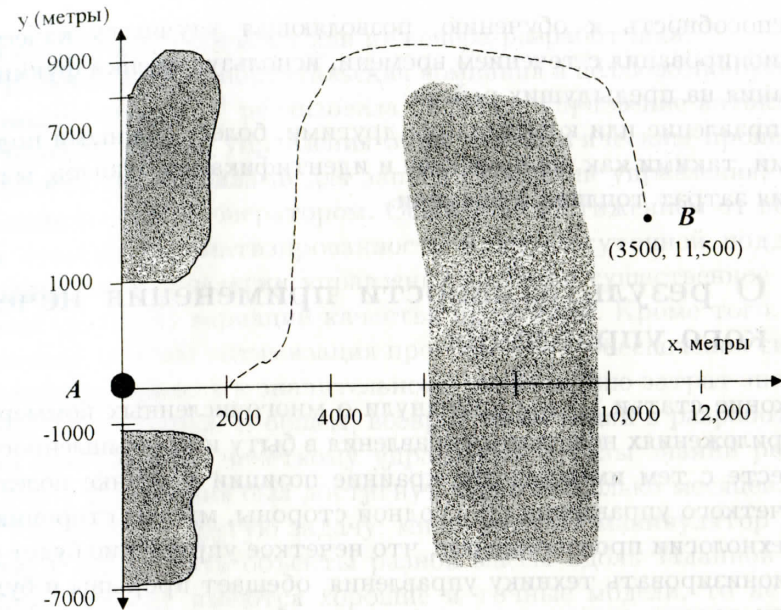


Рис. 5. Карта островов для проводки грузового судна.

тории, изображенной на рис. 5 пунктиром.

Степень интеллектуальности СИУ (рис. 4) характеризуется качеством функционирования и степенью автономности от вмешательств человека. При этом верхний (экспертный) регулятор имеет дело с более медленными аспектами движениями: так он подправляет скорость значительно реже, чем нижний (нечеткий) регулятор обновляет угол поворота руля.

В [7] отмечается, что возможно добавление еще одного – третьего (более высокого) – уровня для встраивания других функций, таких, как:

- дружественный пользовательский интерфейс для капитана и судовой команды,
- интерфейс с метеоинформацией, используемой для изменения проводки судна, основываясь на условиях моря,
- высокоуровневое планирование маршрута доставки грузов,

– способность к обучению, позволяющая улучшать качество функционирования с течением времени, используя оценки функционирования на предыдущих рейсах,

– управление или координация другими, более сложными подсистемами, такими как обнаружение и идентификация отказов, минимизация затрат топлива и времени.

## 2. О результативности применения нечеткого управления

В конце статьи [1] мы упомянули о многочисленных коммерческих приложениях нечеткого управления в быту и промышленности.

Вместе с тем имеются две крайние позиции в оценке полезности нечеткого управления [2]. С одной стороны, многие сторонники этой технологии провозглашают, что нечеткое управление будет революционизировать технику управления, обещает прорывы и будет способно решить сложные технические проблемы с помощью малых затрат. С другой стороны, многие представители управленцев все еще являются активными сторонниками того взгляда, что «все, что может быть сделано в нечетком управлении, может быть сделано также и традиционными средствами теории управления», и прогнозируют в ближайшем будущем спад нечеткого управления как направления теории и приложений.

Понимание того, что обе эти позиции не учитывают реального потенциала нечеткого управления, постепенно возрастает. Использование экспертных знаний позволяет повысить степень автоматизации управления, например, во многих производственных процессах химической промышленности. Здесь традиционно реализуется некоторое множество базовых контуров управления, но на фазах запуска и отключения оператору приходится устанавливать параметры регуляторов или переключать разные блоки управления. Соответствующие знания описываются не в терминах дифференциальных уравнений, а часто скорее в форме «если ситуация такая-то и такая-то, то следует сделать следующее». В этом случае нечеткое управление предлагает метод представления и использования экспертных зна-

ий оператора, технолога или инженера-разработчика.

Например, одна португальская компания в целлюлозно-бумажной промышленности [2] реализовала нечеткое управление автоклавами на верхнем уровне управления этим технологическим процессом с 5 нечеткими правилами для записи стратегии управления, осуществляемой обычно оператором. Основным достижением от повышения степени автоматизированности и круглосуточной поддержки рациональной стратегии управления является существенное уменьшение (до 60 %) вариации качества продукции. Кроме того, последовавшая за этим оптимизация программного обеспечения системы управления привела к значительному уменьшению затрат энергии и потребления сырья. В общем, возврат инвестиций в разработку пакета программ по нечеткому управлению и базы знаний реальной системы управления был достигнут через несколько месяцев.

Рассмотрим другую задачу: многозвенный манипулятор робота должен перемещать объекты разной массы вдоль заданной траектории. Так как имеются хорошие и точные модели, то не составляет большого труда реализовать ПИД-регулятор, работающий с известными массами внутри узкого их диапазона изменения. Однако в случае существенных параметрических изменений или больших внешних возмущений наблюдается резкое ухудшение качества функционирования. При этом ПИД-системы обычно наталкиваются на дилемму: быстрая реакция со значительным промахом или точная, но медленная реакция, или даже возникает проблема стабилизации в целом. В этом случае нечеткое управление позволяет реализовать простые, но робастные решения, покрывающие широкий диапазон возможного изменения и справляющиеся с большими возмущениями. В этом частном случае была реализована [2] СИУ с так называемым нечетким скользящим режимом, который демонстрирует аналогичные характеристики для заданной массы с небольшими вариациями, но перекрывает по качеству ПИД-решение как только вводятся большие изменения массы.

Такого типа решение использовано в СИУ длинным многозвенным манипулятором (около 10м), установленным на космической станции [9], когда требуется устранить негативное влияние люфта в соединениях звеньев на конечную ошибку позиционирования и

обеспечить требуемую точность при широком диапазоне нагрузок.

В работе [4] описываются примеры нечеткого управления запуском-выпуском изделий на технологической операции «металлизация» производства прецизионных резисторов и модели управления роботом-манипулятором в системе «глаз-рука». Подробно описываются используемые нечеткие модели С-СУ-Д и С-Д соответственно.

Нечеткое управление успешно использовано в проекте самолета с высокотехнологичными крыльями (Rockwell's experimental advanced technology wing) [10] улучшенной аэродинамики.

Имеются и другие немаловажные обстоятельства при переходе к интеллектуальному управлению.

В случае интеллектуального подхода к управлению во многом может нивелироваться отрицательный эффект наличия известного коммуникационного барьера между конструкторами и программистами изделия и размытости сфер ответственности за окончательный результат. Этот эффект проявляется в деловых конфликтах, задержках и плановом растягивании срока разработки системы управления. Интеллектуальное управление предлагает языки, понятные соответствующим коллективам разработчиков, а наличие простых и корректных трансляторов из языка нечетких правил в язык элементарных объектов и алгоритмов (табличные функции, интерполяции, компараторы и т.д.) упрощает проблемы коммуникации и разделения сфер ответственности. Например, в сфере автомобильной электроники решалась задача управления холостым режимом на базе 8-разрядных микропроцессоров [2]. На фоне возможных больших параметрических изменений в системе (включая разные дорожные условия и дополнительное энергопотребление рулевым механизмом, кондиционером и т.д.) поддержание постоянной скорости холостого режима двигателя может быть обеспечено нечетким управлением. Время разработки составило примерно 6 человеко-месяцев в отличие от 2 человеко-лет в рамках традиционного подхода.

В Японии слово «нечеткий» стало одним из самых популярных. В быту оно ассоциируется с терминами «современный», «высококачественный», «дружественный». «Кнопка одного касания» в новой стиральной машине заменяет большие управляющие панели старых машин. В 1990 г. японскими производителями продано бытовой не-

етко управляемой техники на сумму в несколько миллиардов американских долларов. Термин «нечеткий» приобрел в Японии самостоятельное маркетинговое значение. Большинство вновь вводимых бытовых приборов маркируются «нечеткий» или «нейро-нечеткий».

Что касается промышленных применений, этот маркетинговый эффект вряд ли состоится, хотя ожидается, что в некоторых случаях нечеткое управление будет использоваться в промышленности и без необходимости, просто для демонстрации приобщенности компаний к технологической конкуренции в сфере интеллектуального управления. Кроме того, ожидается также использование нечеткого управления без улучшения характеристик системы управления и уменьшения стоимости разработки в сфере патентной конкуренции: использование нечеткого управления в качественно эквивалентных решениях помогает обходу существующих патентов.

Ясно, что в большинстве случаев гибридные – интеллектуальные + традиционные – технологии улучшают существующие системы управления. Но зададимся вопросом: *какие имеются пределы у интеллектуального управления*, хотя бы на примере нечеткого управления? Дадим некоторые комментарии к декларациям, публикуемым в рекламных и научных целях.

*Нечеткие регуляторы более робастны, чем обычные.* Имеются многие приложения, где использование нечеткого управления – в чистом виде или в комбинации, например, с ПИД-управлением – обеспечило высокую робастность систем управления. Имеются и другие случаи. Известны [2] две попытки управления системами воздушного кондиционирования на основе нечетких логик и лишь с двумя небольшими отличиями в структуре и базе знаний: одна попытка оказалась успешной, обеспечив высокую робастность даже при больших возмущениях, другая привела к неустойчивости. По-видимому, еще не до конца методологически ясно, для какого типа технических задач управления нечеткое управление ведет к улучшению робастности и устойчивости и как проектные решения влияют на эти свойства. Вместе с тем, для нечетких систем управления есть первые приемлемые критерии устойчивости. Такие критерии обсуждаются в [11, 12] и можно утверждать, что нечеткое управление и в этом смысле начинает конкурировать с обычным нелинейным управлением.

*Нечеткое управление сокращает время разработки.* Пример автомобильной электроники, упомянутый ранее, как и ряд других подтверждает это, хотя на начальных этапах освоения технологий нечеткого управления может быть, разумеется, и обратный эффект.

*Продукция, использующая нечеткое управление, легче продается.* Это характерно для бытовой техники в Японии. Вместе с тем надежный маркетинг должен фокусироваться не на модной этикетке «нечеткий», а на потребительских свойствах: повышение уровня интеллектуальности и дружелюбности интерфейса, дополнительные функции и ресурсные аспекты, такие, как экономия энергии, уменьшение расхода свежей воды (в стиральных машинах) и т.д. Ввиду наличия параллельных средств искусственного интеллекта и меньшей зависимости этой области интегрально от конъюнктуры рынка в бытовых электронных приборах и видеооборудовании использование нечеткого управления не упоминается (по понятным причинам, термин «нечеткая автофокусирующая система» вряд ли является маркой качества и большинство поставщиков таких товаров использует термин «цифровая или интеллектуальная (автофокусировка)», даже если в приборе используется нечеткая логика).

По оценке настоящего и будущего рынка приборов нечеткого управления, данной в [2], примерно 10–15% всей электрической и электронной техники выиграет от использования нечеткого управления в форме «усиливающей» или «безальтернативной» технологии.

С другой стороны, в областях с чисто информационными технологиями управления (базы данных, экспертные системы в финансовом секторе и т.д.) имеется все еще малое, хотя и возрастающее число приложений нечеткой логики.

*Нечеткое управление ведет к более высокой степени автоматизации для сложных, плохо структурированных процессов.*

Это справедливо, но только если имеется подходящее знание о процессе, которое может быть хорошо представлено в терминах нечетких правил. Существуют различные процессы, для которых такого знания нет вовсе или его нет в необходимой степени. Например, если в системе управления возможны ситуации таких отказов элементов (подсистем), которые заранее не предусмотрены и не обеспечены средствами их обнаружения и локализации, равно как и

автоматическим выходом в соответствующие априорно предусмотренные аварийные режимы, то система управления должна надеющейся базой знаний принять наиболее рациональное решение (существовать реконфигурацию) с predetermined заранее целью (сохранение работоспособности и т.п.) или, еще лучше, с возможным пересмотром цели и критериев качества управления. При этом может понадобиться заранее не предусмотренным (совокупностью экспертных правил «если..., то...») способом спланировать целую последовательность действий по выводу системы в работоспособное состояние. Для этого нужны другие методы интеллектуализации, с другими формами представления и обработки знаний, вообще говоря, обеспечивающие более высокий уровень интеллекта. В частности, могут понадобиться более мощные методы «обдумывания» ситуации, обрабатывающие знания более общего вида, нежели просто использующие правила, априорно заготовленные или несколько модифицируемые в процессе функционирования. К таким методам относятся, например, упомянутые в п. 7 [1] методы АДТ и вообще методы логического вывода. Рассмотрим их несколько подробнее.

### 3. О методах логического вывода для управления динамическими системами.

Методы логического вывода служат для автоматизации доказательства теорем, построения следствий (развертывания теорий), порождения гипотез и т.д. В п. 7 [1] мы подчеркивали, что системы АДТ работают обычно в полной первопорядковой логике и существенно превосходят сегодня другие средства ИИ с точки зрения глубины логических выводов и сложности доказываемых ими утверждений (математических теорем).

Для анализа возможностей сближения систем логического вывода (в том числе АДТ) и уже существующих систем интеллектуального управления (в реальном мире), основанных на правилах, целесообразно воспользоваться чисто логическим взглядом на них. С точки зрения этого взгляда на правила «интеллектуального» варианта ПИД-



регулятора, описанные в п. 1, эти правила имеют форму

$$\forall x_1 \dots \forall x_n (P_{i_1}(x_1) \& \dots \& P_{i_n}(x_n) \rightarrow \exists u Q(u)), \quad (3.1)$$

где  $x_1, \dots, x_n, u$  – переменные,  $P_{i_1}, \dots, P_{i_n}, Q$  – предикатные символы. При этом логические формулы указанного вида имеют конструктивную семантику: по заданным значениям переменных  $x_1, \dots, x_n$ , таким, что справедливо  $P_{i_1}(x_1), \dots, P_{i_n}(x_n)$ , устройство управления формирует («умеет конструктивно найти») такое значение переменной  $u$ , что имеет место  $Q(u)$ . О бедности знаний, допускающих формализацию в форме указанных правил, свидетельствует тот факт, что семантика формул (3.1) формализуема также в пропозициональном (булевском, непредикатном) виде

$$p_1 \& \dots \& p_n \rightarrow q, \quad (3.2)$$

где  $p_1 \& \dots \& p_n, q$  – пропозициональные переменные фрагмента конструктивного (интуиционистского) исчисления высказываний, причем  $p_j$  (соответственно  $q$ ) конструктивно истинно тогда и только тогда, когда задано значение переменной  $x_i$  (соответственно положено  $u$ ), такое, что имеет место  $P_{i_j}(x_i)$  (соответственно  $Q(u)$ ). Тогда даже чуть более общие, чем (3.1), формулы

$$\forall x_1 \dots \forall x_n (P_{i_1}(x_1) \& \dots \& P_{i_n}(x_n) \rightarrow \exists u Q(x_1, \dots, x_n, u)) \quad (3.3)$$

уже не представимы в пропозициональной форме. Формулы (3.3) как и (3.1), (3.2), могут выражать конструктивную реализуемость некоторого умения получать  $u$  по задаваемым  $x_1, \dots, x_n$ , но – в отличие от (3.1) и (3.2) – не только само значение  $u$ , но и выраженные свойства, представленного с помощью символа  $Q$ , теперь существенно зависят от значений  $x_1, \dots, x_n$ . Например, в классе формул (3.3) можно записать утверждение о том, что «для заданных положительных, целых, четных  $x$  устройство конструктивно вычисляет  $u = -0,5x$ », а в классе (3.1) или (3.2) выразима лишь более бедная информация; в частности, в том же примере мы смогли бы представить знание о том, что «для заданных положительных, целых, четных  $x$  устройство конструктивно вычисляет отрицательное, целое  $u$ », то есть выразить точно связь значений переменных  $u$  и  $x$  в

классе формул (3.1), (3.2) не удастся (табличное представление для аппроксимации этой зависимости принципиально не меняет этого вывода).

Отсюда видна ограниченность знаний, с которыми работает ИУ, основанная на нечетких правилах логической формы (3.1), следовательно, и ограниченность класса решаемых задач управления. В то же время, традиционная система АДТ работает не только формулами вида (3.3), но обычно и со всем запасом формул предикатных исчислений.

На наш взгляд, проникновение полных первопорядковых логик методов автоматизации логического вывода (в частности, в форме АДТ) в сферу интересов и компетентности специалистов по теории управления является весьма существенным, позволяя развить теорию управления в направлении расширения потенциала решения сложных задач управления, увеличения степени автоматизации, создания СИУ, в большей степени оправдывающих свое название, благодаря повышению уровня их интеллектуальности. При этом теория управления и искусственный интеллект становятся значительно более совместимыми, поскольку предикатные языки (1-го и более высоких порядков) существенно более выразительны и охватывают вещественные и др. переменные. Грубо говоря, выразительная сила предикатных языков так соотносится с выразительной силой булевских (пропозициональных) языков, как выразительная сила языка математической теории управления соотносится с выразительной силой языка двоичной арифметики. Предикатные языки позволяют формализовать более широкие знания для последующей обработки машинно-ориентированными правилами. Каждое правило формализует не столько специальный (локальный) переход от условий к действию, выражающий более или менее очевидным образом отдельный шаг приближения к цели управления, сколько интуитивное представление человека о правильности (логичности) умозаключений, то есть имеет более универсальный характер.

Применимость логического вывода в контуре управления, помимо прочего, базируется на том, что цель управления и возможности доступных при этом средств достижения цели могут быть описаны в логическом языке. Тогда свойство разрешимости задачи управления

эквивалентно конструктивной логической выводимости формулы или их отрицаний. При этом знание теряет не только наглядность для человека (что естественно и является продолжением доминантности метода резолюций, состоящего в однородности материального метода обработки механически), но и те структурные (синтаксические и семантические) свойства, которые могут быть полезны для организации той или иной стратегии вывода, учитывающей специфику предметной области, например, динамичность мира и связанную с этим желательность введения понятия «время». Утраченные структурные свойства естественных форм представления знания начинают расфокусировку внимания и ухудшение совместимости логического вывода с возможными эвристиками, в том числе отражающими специфику применения знаний о функционировании СИУ, знаний для оценки качества процессов при разных управлениях, для оценки истечения времени принятия решений и т.п. Недостатки метода резолюций еще более ощутимы в задачах управления в реальном времени.

Пусть  $A$  выводимо из  $B_1, \dots, B_n$ . Если найденный (обычно многоступенчатый!) вывод конструктивен, то из него алгоритмически можно извлечь искомое управление как целенаправленная последовательность действий.

Таким образом, система АДТ как интеллектуальная компонента СИУ реализует автоматическое доказательство теорем, в том числе вида  $\bigwedge_{i=1}^n B_i \rightarrow A$ , и формирует соответствующее управление, обеспечивающее достижение цели управления, может быть, в многоступенчатом процессе, когда вывод и отработка полученного управления многократно чередуются, а каждый вывод значения управления в свою очередь является обычно многоступенчатым.

Иначе говоря, система АДТ, обрабатывая разные (!) знания, находя в общем случае целую последовательность (!) действий, способна вырабатывать план достижения цели управления.

Сложность, которая здесь возникает, это необходимость учета изменчивости мира. СИУ должна иметь способность к рассуждениям о поведении данных и знаний с течением времени, о связи прошлых, настоящих и будущих событий. Динамичность мира вызывает уже действиями самой СИУ. Очевидное решение, доступное в классе предикатных языков, — это расширение списка аргументов каждого «динамического» предиката (то есть истинность которого при тех же значениях старых аргументов может меняться с течением времени) дополнительным аргументом, обозначающим момент времени рассмотрения истинности/ложности этого предиката. К сожалению, этот подход предъявляет высокие требования к эффективности системы логического вывода в силу повышенной громоздкости представления знаний и, вследствие этого, сложности обработки полученных логических формул. Так, прямое использование метода резолюций [13] может не обеспечить требуемой эффективности.

Один из основных недостатков метода резолюций состоит в том, что он нуждается в предварительном преобразовании знаний в «росты» мелких утверждений, а именно в множество дизъюнктов, то есть в множество дизъюнкций, образованных из элементарных фор-

или их отрицаний. При этом знание теряет не только наглядность для человека (что естественно и является продолжением доминантности метода резолюций, состоящего в однородности материального метода обработки механически), но и те структурные (синтаксические и семантические) свойства, которые могут быть полезны для организации той или иной стратегии вывода, учитывающей специфику предметной области, например, динамичность мира и связанную с этим желательность введения понятия «время». Утраченные структурные свойства естественных форм представления знания начинают расфокусировку внимания и ухудшение совместимости логического вывода с возможными эвристиками, в том числе отражающими специфику применения знаний о функционировании СИУ, знаний для оценки качества процессов при разных управлениях, для оценки истечения времени принятия решений и т.п. Недостатки метода резолюций еще более ощутимы в задачах управления в реальном времени.

Важно отметить, что сложная структурированность знания (сложность изначальной формульной структуры в сравнении с машинизированной структурой дизъюнктов) Дж. Робинсоном, автором метода резолюций [13], квалифицировалась как негативное свойство с точки зрения эффективности АДТ. Однако это не так. В [14–19] предложены новые типово-кванторные языки позитивно-образованных формул, а также логические исчисления и механизмы поиска выводов, которые тоже являются машинно-ориентированными, но способны работать с более сложными формами представления знаний. При этом сложность формул оборачивается полезным богатством структуры, хорошей совместимостью с эвристиками, укрупненностью понятийного базиса и обрабатываемых деталей и, как следствие, сокращением комбинаторики.

Имеются убедительные свидетельства компактности и выразительности этих типово-кванторных языков и примеры легко доказываемых теорем, на которых споткнулся метод резолюций (пример с «паровым катком» Л. Шуберта [20]). Перевод формулы исчисления предикатов в язык позитивно-образованных формул не разрушает эвристическую структуру исходной формулы и практически не увеличивает длину получаемого выражения, тогда как перевод даже

бескванторной формулы

$$(P_1^1 \& \dots \& P_n^1) \vee \dots \vee (P_1^m \& \dots \& P_n^m)$$

на язык метода резолюций – язык дизъюнктов, приводит к множеству из  $n^m$  дизъюнктов. Некоторые приложения типово-кванторных языков и средств АДТ в задачах управления описаны в [14–17, 23].

Другой подход к повышению эффективности логического поиска к построению СИУ намного ранее предложен разработчиками системы STRIPS, упоминавшейся в [1]. Типичная, решаемая ею задача «убрать деталь в контейнер» предполагает планирование действий (как верхний, абстрактный уровень программирования траекторий) в изменяемом мире. Это – задача более интеллектуального уровня, чем только стабилизация программных движений, осуществляемая, в частности, как мы видели, в форме интеллектуального аналога ПЛАНУС управления в классе формул (3.1). При достаточно общем описании знаний соответствующая задача нуждается в существенно более мощных языковых средствах, чем (3.1).

Разработчики системы STRIPS использовали метод резолюций [13] как метод АДТ для автоматизации планирования действий. Однако из-за динамичности знаний (факты могут устаревать) для повышения эффективности их обработки потребовалось использовать достаточно естественное решение, основанное на комбинации универсальной логики и априорных, предусмотренных человеком, алгоритмов ритмов обновления знаний. При этом всегда существует только обновленный, но статический мир (вся предыстория забывается для облегчения задачи обработки информации). Создатели STRIPS'а были вынуждены прибегнуть к этому компромиссу «логика + алгоритмы» по причине указанного и других недостатков метода резолюций (несмотря на его революционность на этапе своего появления).

Третий подход состоит в использовании неклассических логик. Их применение в принципе может обеспечивать наиболее естественное представление знаний и совместимость с эвристиками для эффективного вывода управлений. Основной недостаток состоит в необходимости специализации под предметную область, то есть заню

дбирать или изобретать под новый класс задач наиболее подходящее логическое исчисление. При этом с учетом меньшей разработанности средств АДТ для неклассических логик может потребоваться изобретать «с нуля» эффективную и соответствующую целям решения этого класса задач стратегию поиска вывода.

В целом, СИУ, основанная на логическом представлении и обработке знаний, как впрочем и все современные компьютеризированные САУ, подпадают под класс так называемых гибридных систем [24]. «Гибридным управлением» называют управление непрерывными ОУ с помощью автоматов (в частности, ЭВМ). Другие термины – системы с цифровым управлением, логико-динамические системы (ЛДС). Следует, правда, заметить, что последний термин (ЛДС) в отечественной литературе используется уже давно. Он часто используется, например, для систем, описываемых дифференциальными (или разностными) уравнениями с правыми частями, переключаемыми по логическим условиям [25, 26]. Например, это могут быть системы указанных уравнений, рассматриваемые в совокупности с уравнениями некоторого автомата, и при этом правые части всех уравнений могут зависеть от полного вектора переменных всей совокупности уравнений [26]. Более сложные ЛДС рассмотрены, например, в [27].

Из сказанного вытекает, что термин «СИУ» обозначает подкласс ЛДС (или гибридных систем). Для выделения тех СИУ, в которых формирование управления осуществляется на основе логического вывода, мы используем термин *логико-управляемые системы* (ЛУС), так как термин «системы логического управления» также занят (в последнем случае – это управление на основе логических и других автоматов [28–30], сетей Петри, графов операций [31, 32] и т.п.).

Помимо проблемы представления динамичности знаний в ЛУС, как и вообще в СИУ, необходимы методы учета ограниченности ресурсов (времени, памяти, информации), в том числе в аспектах неполноты и иррелевантности знаний. В ЛУС может возникать также так называемая проблема неразрешимости. Эти вопросы рассматриваются в следующем пункте.

#### 4. Некоторые проблемы и их решение в логико-управляемых системах

СИУ в режиме реального времени (РВ) решают жесткие и кие задачи [33]. В жесткой задаче РВ корректное действие или рние зависит не только от результатов формирования управления и времени, в течение которого эти результаты получены, причем ход за временные ограничения означает полную бесполезность увления. Пример – навигационная система на борту ракеты. В мяа задаче РВ также имеются временные ограничения, но выход за менные ограничения приводит к постепенной (обычно монотон по времени) потере ценности управления.

Согласование требования работы СИУ в режиме РВ с возмным эффектом медлительности логического вывода состоит в таорганизации формирования управления, при которой первое прижение управления выводится быстро, но, может быть, с низким качеством и, если еще остается ресурс времени на его улучшение это управление итеративно улучшается вплоть до момента перичи его на исполнение. Такие алгоритмы ИИ за рубежом именуют «Anytime Algorithms» – алгоритмы, «всегда готовые» выдать гр(низкокачественное) или более совершенное управление [34, 35].

При этом можно использовать систему логического вывода что формирование управления будет обеспечиваться в стиле ибинированного управления [36] (п. 1 [1]): управление по принцип обратной связи в комбинации с упреждающим логическим модированием управляемого процесса при альтернативных управлен. Глубина просмотра будущего может зависеть от жесткости режРВ. С логической же точки зрения, здесь вместо априори задаатеоремы выводятся лишь следствия текущего состояния при тернативных управлениях. Эти следствия могут выражать свойсоответствующих траекторий, важные для оценки качества увлений. Реализуемость этого подхода к построению СИУ показана в [17]. Ниже мы будем именовать его автоматическим выводом стствий (АВС).

СИУ не могут работать эффективно со слишком бедной инс

цией. Но и слишком много знаний также вызывают в существующих автоматических СИУ тенденцию к деградации. Поэтому важное значение имеет также решение проблемы *иррелевантности знаний*, то есть смешанности полезных знаний с бесполезными, которые лишь усложняют обработку знаний. Известно [37], что около 90% нейронных окончаний в нашем мозге являются запрещающими и служат для игнорирования и подавления сигналов от органов чувств. Более того, в ходе обдумывания проблемы мы в явной форме рассуждаем о релевантности отдельных сущностей в нашей концептуализации рассматриваемой проблемы. Тем самым мы стремимся упростить формулировку проблемы и исключить расточительные действия при ее решении.

В работе [38] дан логический подход к учету иррелевантности в контексте обеспечения эффективных дедуктивных построений над большими базами знаний (хорновского типа). При этом достигнуто весьма существенное ускорение обработки запросов на основе автоматического вывода утверждений об иррелевантности определенно типа [38]. Подробному рассмотрению этой проблемы посвящен отдельный номер журнала «Artificial Intelligence» (1997, №97) как в контексте логических выводов, так и обработки изображений (например, в задаче автоматического управления автомобилем на автоассах – с целью выделения разграничительных линий дорожного полотна, загромаждаемых изображениями других автомобилей).

В богатых логических теориях одновременно с увеличением выразительной и дедуктивной силы возникает и заслуживает внимания неразрешимость проблемы выводимости. Уже классическое исчисление предикатов является *неразрешимым*, как это независимо показали еще в 30-е годы А. Черч [39] и А. Тьюринг [40]. Точнее, оно является только *полуразрешимым*, то есть существует процедура, распознающая любую теорему как доказуемую, однако не существует процедуры, классифицирующей произвольную формулу, является ли она теоремой или не является таковой. Это фундаментальное негативное свойство достаточно богатых логических систем является прямым продолжением их достоинства – высокой выразительной силы, позволяющей охватить в своей формализации существенно более широкий пласт знаний, а, следовательно, и поддержать более ши-

рокий класс задач управления, включая более сложные, к которым просто неприменимы более бедные, хотя и разрешимые, логические теории.

Таким образом, достаточно богатые логические системы знают все принципиально доказуемые в них теоремы, но в силу доказательства некоторых недоказуемых утверждений могут работать неограниченно долго, не проявляя видимых признаков того, что доказываемое утверждение принципиально недоказуемо. Негативный эффект этого усиливается на практике ограниченностью ресурсов.

Разумеется, сама по себе ограниченность ресурсов является отрицательным фактором и в разрешимых (более бедных) дедуктивных системах, например, в пропозициональных исчислениях. Вместе с тем, неразрешимость (полуразрешимость) выступает принципиальным недостатком богатых систем АДТ, тормозящим их широкое применение в теории и практике интеллектуального управления и является платой за расширение класса решаемых задач.

Казалось бы, это ставит предел применению не только логики и вообще ЭВМ. Но, как отмечал еще В.М. Глушков [41], «проблемы теоретической и практической разрешимости задачи лежат совершенно разных областях». Необходимо найти не универсальный алгоритм, который решал бы все проблемы пусть даже конкретной области, а «практически функционирующие алгоритмы, которые работали бы так же или лучше, чем специалист этой области».

Сказанное касается и задач с неполной информацией, когда доказуемую теорему  $F_1 = (\&_{i=1}^n B_i \rightarrow A)$  (о достижимости цели управления  $A$  над имеющимися средствами  $B_i$ ) можно пытаться преобразовать, например, в доказуемую теорему  $F_2 = H \rightarrow F_1$ , где  $H$  — дополнительные гипотезы, при которых  $F_1$  становится доказуемой. При этом  $H$  может быть либо 1) спецификацией недостающих конструктивных средств, либо 2) некоторым дескриптивным знанием, выражающим условие, при истинности которого цель управления достижима, либо 3) формулой смешанной семантики, выражающей одновременно и первое, и второе.

Методы пополнения информации путем гипотезирования были указаны в п. 8 [1]. В частности, метод последовательного порождения

гипотез [42] может преобразовать принципиально недоказуемое рассматриваемом исчислении утверждение в теорему, то есть преобразовать неразрешимую задачу в разрешимую, если синтезированные дополнительные гипотезы являются истинными (в нужном смысле — дескриптивном, конструктивном или смешанном). Метод полезен и в случае ограниченности ресурсов времени — памяти, так как в случае нехватки этих ресурсов метод ускоряет вывод теорем ценой введения дополнительных избыточных условий. Основная идея этого метода гипотезирования состоит в следующем:

- в чередовании дедукции и синтеза новых условий доказуемости, управляемом логически с учетом некоторых признаков недоказуемости или исчерпания ресурсов;
- в разработке и использовании человеко-ориентированных правил упрощения порожденных гипотез (правил типа декомпозиции, обобщения, конкретизации и т.п.);
- в специальном механизме ограничения или расширения языка, в котором порождается гипотеза.

Таким образом, метод последовательного порождения гипотез пытается доказать исходное утверждение, а при появлении трудностей с его доказательством синтезирует фрагмент будущей гипотезы, немедленно применимый для использования в незавершенном доказательстве. Если продолженное доказательство снова сталкивается с трудностями, то синтезируется следующий фрагмент гипотезы и т.д. Под трудностями доказательства понимается, например, исчерпание допустимого времени непрерывного доказательства; если же будет исчерпан полный временной ресурс доказательства (то есть с промежуточным синтезом фрагментов гипотезы), то синтезируется условие, априори достаточное для доказуемости полученной до этого формулы, может быть довольно грубое, но не требующее доказательства своей достаточности.

Органическое сочетание АДТ с порождением гипотез приближается в большей мере к стилю умозаключений человека, нежели каждая из этих интеллектуальных функций в отдельности. Вместе с тем современное состояние этого направления исследований по созданию СИУ, сочетающих АДТ и автоматическое гипотезирование, обеспечивает пока большую приложимость результатов именно

в человеко-машинных системах, поскольку автоматическое гипотезирование может приводить к целому спектру возможных гипотез, окончательная оценка и принятие которых, вообще говоря, требует мотиваций и умения пересматривать цели.

Резюмируя, заметим, что слабая на сегодня приспособленность большинства систем АДТ к задачам РВ не является абсолютно преодолемым барьером и фатальным следствием названного преимущества перед другими видами интеллектуальных компонент СИУ. Такое заключение можно сделать как на базе рассмотренных п.п. 3, 4, так и других работ, оставшихся не упомянутыми здесь, потому, что вот-вот подойдут новые суперпроизводительные модели ЭВМ, способные в большей степени поддерживать сложные вычисления в режиме РВ (хотя и это не бессмысленно, так как последовательное поднятие планки сложности задач не может не улучшать постепенно применимости средств АДТ в задачах РВ). Указанный недостаток является постепенно устранимым, более того, он уже сегодня замечательно нивелируется при должном учете специфики интеллектуальных подзадач задачи управления и выбора такой архитектуры СИУ, которую бы были встроены *разные виды принятия решений* – «обдумывания» на основе знаний (путем АДТ, АВС и другими методами) до рефлекторных реакций (искусственные нейронные сети).

При этом важно иметь возможность автоматического преобразования декларативного знания в процедурное, то есть от уровня обдумывания (на основе АДТ и других методов) к продукционному уровню («если ..., то ...») и ниже – к рефлекторному уровню. Такая архитектура обсуждается в [43–45] (рис. 6). Обучение на основе обобщающего анализа (п. 8 [1]) – один из методов такого преобразования.

Остается фактом необходимость разработки методов априорной оценки нелинейных эффектов в системах интеллектуального управления. Разумеется, в стиле приближения к идеологии ИИ эта проблема в известном смысле может перекладываться на этап эксплуатации именно на саму систему. Однако методы самодиагностирования, самонастройки и самореорганизации еще далеки от такой постановки самоанализа и самоорганизации. Поэтому необходимо развитие теории нелинейного анализа динамических и структурных свойств

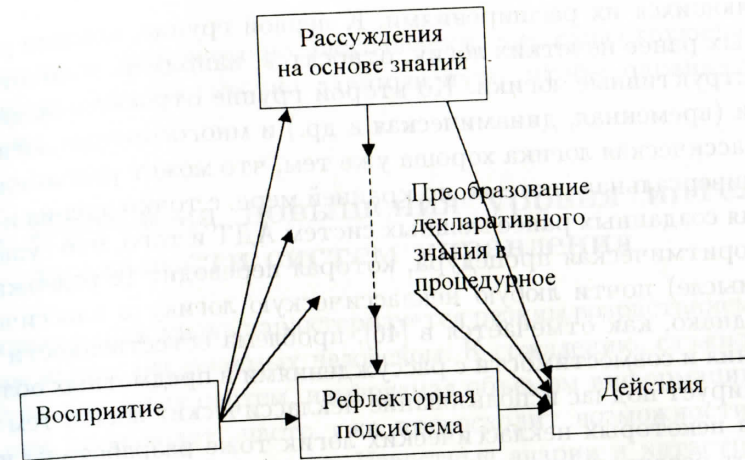


рис. 6. Повышение эффективности систем реального времени путем преобразования декларативного знания в процедурное.

У. Положительные прецеденты имеются. Например, в работах [2, 12] дается математическое описание логико-динамических процессов в системах нечеткого управления и методы анализа устойчивости, инвариантности и других свойств. В [27] вопросы управляемости изучаются применительно к логическим схемам (цифровым, переключаемым) с непрерывным внутренним состоянием элементов и дискретным выходом с учетом инерционности элементов. При этом ЛДС описывается системой интегро-операторных и дифференциально-операторных и логических уравнений, где интегральная часть описывает динамику изменения внутренних состояний элементов (накопление заряда – разряд), операторное – динамику выходов (0 или 1), а логическая часть – логику функционирования схемы.

Что касается предпочтения между разными логическими средствами верхнего уровня принятия решений в СИУ, то, как это отмечалось в п. 3, абсолютных приоритетов здесь нет. Так, среди неклассических логик, используемых в принятии решений, существуют две группы: конкурирующих с классическими логиками

и являющихся их расширениями. К первой группе, помимо речевых ранее нечетких логик, относятся, например, многозначные и конструктивные логики. Ко второй группе относятся модальные логики (временная, динамическая и др.) и многосортные логики.

Классическая логика хороша уже тем, что может использоваться как универсальная система, по крайней мере, с точки зрения использования созданных ранее мощных систем АДТ и того, что существует алгоритмическая процедура, которая переводит (в содержательном смысле) почти любую неклассическую логику в классическую [46]. Однако, как отмечается в [46], проблема естественности представления и совместимости с рассуждениями в предметных областях стимулирует подчас использование неклассических логик, тем более что для некоторых неклассических логик тоже разработаны и продолжают развиваться методы АДТ (см., например, методы резолюционного типа для нечетких логик – [47], для модальных логик – [49], для многосортных логик – [20, 50]).

Внутри логического подхода к автоматизации рассуждений, помимо отмеченных выше логик, интересным и перспективным направлением является обработка знаний в условиях неопределенности, и, в частности, разработка выразительных языков первоуровневых вероятностных логик. ИИ по существу только приступает к серьезному интегрированию логического и вероятностного подходов, хотя продукционные системы с оценками правдоподобия (вероятности истинности) правил используются давно. В задачах со сложными предметными областями помимо использования первоуровневых модальных и многосортных логик, возрастает интерес к комбинированию логик [51–53]. Это отражает ту же тенденцию, и для систем, основанных на правилах (пример совмещения в одной СИУ одновременно двух машин вывода на основе продукционных (четких) и нечетких правил изложен в работе [54] применительно к задаче управления группой лифтов в высотных зданиях).

Вместе с тем, резюмируя все ранее изложенное, следует заметить, что несмотря на определенные успехи интеллектуального управления, как области исследований (и логического подхода в ней в частности), даже если указанные в определении систем интеллектуального управления (п. 11 [1], [55]) интеллектуальные функции по-

суть очень ограничительно, оказывается, что существующие СИУ должны пройти достаточно длинный путь, чтобы оправдать свое название.

## 5. Проблема повышения уровня интеллектуальности систем управления

Современная жизнь характеризуется резким возрастанием сложности систем, создаваемых человеком. К сожалению, сложность автоматизированных систем, измеряемая объемом информации, которую они производят, часто уже превосходит возможности людей по анализу этой информации. Известные аварии и катастрофы на транспорте, в промышленности, энергетике и др. (Тримайлайнд, Бхопал, Чернобыль) связываются с перегрузкой операторов и/или недостаточным качеством проектирования управляемых систем, возникновением нештатных ситуаций неуправляемости. Традиционные методы управления не обеспечивают требуемой эффективности формирования управлений в условиях:

- недостаточности априорной информации о внешней среде функционирования;
- большого количества трудно учитываемых факторов нестационарности и субъективного их характера;
- изменчивости целей и критериев качества управления вследствие деградации (отказов, аварий) или целенаправленной реконфигурации (восстанавливающего или развивающего управления).

Для таких задач было бы естественно попытаться использовать, создать и развить наиболее интеллектуальные системы и компоненты управления.

Полезно упомянуть здесь вкратце и прокомментировать пять принципов организации СИУ, предложенные в [56] (с некоторыми изменениями в формулировках).

*Первый принцип* (принцип информационного обмена). Наличие тесного информационного взаимодействия СИУ с реальным внешним миром с использованием специально организованных информационных каналов.

Комментарий: если в традиционных системах автоматического управления внешние, априори не запланированные, неизвестные воздействия являются скорее негативным фактором, именуемым этой причине «возмущением», то в СИУ внешние воздействия могут иметь также характер информационной «подпитки», позволяющей организовать антиэнтропийный процесс самоорганизации. Находясь в тесном взаимодействии с изменяющимся внешним миром, система получает информацию для пополнения знаний и принятия решений.

Сформулированный выше принцип предполагает наличие в СИУ модели мира. Следующий принцип предусматривает ее пересмотр и подстраиваемость к изменяющимся условиям мира.

*Второй принцип* (принцип открытости, или развиваемости). Открытость СИУ для самообучения и самоорганизации.

Комментарий: для реализации принципа необходима способность системы преобразовывать сигнальную информацию в данные и, что существенно труднее, в знания. Очень трудной задачей в проблеме приобретения знаний является формирование достаточно адекватной модели мира – на основе такой фундаментальной интеллектуальной функции, как формирование новых понятий и отношений целесообразным экспериментированием во внешнем мире.

*Третий принцип* (принцип прогнозирования). Предсказание изменений в мире (среде и системе) при разных предположениях.

Комментарий: в качестве указанных предположений могут выступать альтернативные управления, для каждого из которых система осуществляет прогноз динамики на определенный отрезок времени вперед с целью оценки и отбора наиболее предпочтительных управлений и соответствующей коррекции текущего, реализуемого управления.

*Четвертый принцип* (принцип возрастания точности с уменьшением интеллектуальности – increasing precision with decreasing intelligence [57]). Наличие у СИУ многоуровневой структуры, построенной в соответствии с правилом: повышение интеллектуальности и снижение требований к точности по мере повышения уровня управления в системе (и наоборот).

Комментарий: более верхний (более высокого ранга) уровень решает исходную или более близкую к исходной, более сложную, бо-

творческую задачу, которая зачастую и не может быть решена чисто алгоритмически, в силу отсутствия точной постановки и подходящей теории (алгоритма), а решением является взаимозаменяемая совокупность более простых подзадач, решение которых совокупности обеспечивает решение рассматриваемой задачи более высокого уровня. Неточность или неполнота знания о модели СИУ, самой СИУ и среде компенсируется введением дополнительных более высоких уровней интеллектуальности.

*Пятый принцип* (принцип частичности деградации).

Комментарий: допускается разве лишь частичная утрата работоспособности при нарушениях в работе высших уровней управления, лишь частичная деградация, лишь некоторое ухудшение качества функционирования при отказах и сбоях подсистем высших рангов, благодаря децентрализации управления, частичному дублированию функций, перекрестным связям.

Для оценки эффективности СИУ важное значение имело бы умение измерять уровень интеллектуальности (интеллектуальную силу) автоматических и человеко-машинных систем. С нашей точки зрения *уровень интеллектуальности* (уровень интеллекта) *некоторого агента определяется*, прежде всего,

- А) способностью агента использовать старые знания в новых, может быть, заранее неизвестных проблемных ситуациях и
- Б) широтой проблемных областей, где оцениваемый агент принимает как активный решатель задач.

Свойства А) и Б) очень интегральные и, например, могут включать способность планировать действия и самообучаться. Важность требования автономности функционирования агента или – в известной мере, противоположного свойства – умения взаимодействовать с другими агентами для совместного решения проблемы управления, равно как и требования нормального функционирования в условиях противодействия других агентов, зависит от проблемной области.

Можно различать два главных класса СИУ: 1) класс, в котором СИУ прямо (без участия человека) осуществляет функционирование, то есть полностью замещает традиционные алгоритмы управления (или использует их в сочетании с интеллектуальными



компонентами управления); 2) класс, в котором в СИУ реализуется *человеко-машинное управление*, то есть с участием человека. СИУ этих двух классов могут именоваться как автоматические человеко-машинные системы интеллектуального управления (АСИУ, ЧМСИУ).

Если человеко-машинное управление понимается в этом широком смысле (как управление с тем или иным участием человека), а человека рассматривать как второе «устройство интеллектуального управления», то могут существовать разные схемы взаимодействия двух устройств с общим для них объектом управления. Дальнейшее обобщение может связываться с рассмотрением двух или более СИУ (АСИУ и/или ЧМСИУ), когда каждая СИУ имеет свой объект управления, но взаимодействует с другой (другими) СИУ прямо или через общую среду (общие расходуемые ресурсы). Такие постановки принадлежат пограничной области нарождающейся в искусственном интеллекте теории *многоагентных систем* [58] (Multiagent Systems) и теории игр.

Поскольку свойства А) и Б) трудно оценить количественно, целесообразно в контексте традиционных и перспективных задач управления дать *качественную шкалу* возрастания *потенциала решения задач* в системах автоматического (и автоматизированного) управления. В нижеприведенной шкале каждый класс систем включает предыдущие с точки зрения охвата их возможностей управления:

1. Системы программного управления (разомкнутые системы).
2. Системы с обратной связью (замкнутые системы).
3. Системы идентификационного управления.
4. Системы адаптивного управления (системы с самонастройкой).
5. Системы интеллектуального управления (СИУ без целеполагания).
6. Интеллектуальные системы управления (СИУ с целеполаганием, формированием новых понятий и отношений в развиваемой области мира).

Появление уровней интеллектуального управления 5 и 6 (без целеполагания и с целеполаганием), вообще говоря, переводит наши представления в сферу кибернетики, определяемой в [59] как «наука об управлении, связи и переработке информации» (буквально «искус-

ство управления рулем»). «Автоматизация дедуктивных построений распознавание образов – важные составные части раздела кибернетики, получившего название «искусственный интеллект», где особая группа задач возникает при изучении целенаправленного поведения, методов выбора целей и подцелей и планов их достижения» [59].

«Под *интеллектуальной системой* понимается объединенная информационным процессом совокупность технических средств и программного обеспечения, работающая во взаимодействии с человеком (коллективом людей) или автономно, способная на основании сведений об окружающей среде и собственном состоянии при наличии знаний и мотивации синтезировать цель, принимать решение о действиях и находить рациональные способы достижения цели» [60].

Появление функции целеполагания, а вместе с ней и развиваемой модели мира, существенно отличает интеллектуальные системы управления от СИУ без целеполагания, однако создание *автоматических систем* с целеполаганием остается весьма сложной проблемой. Вместе с тем, в настоящее время в классе интеллектуальных систем управления содержатся те СИУ, в которых имеются определенные средства воздействия со стороны оператора для того, чтобы по его желанию и с учетом обстановки изменять цели и критерии качества функционирования СИУ, а также модель мира. Воздействия оператора на процесс управления могут быть и шире, но принципиально новым качеством, не достигнутым в современных автоматических СИУ, является *мотивированный интеллектуальный выбор цели, не сводящийся к выбору одной из нескольких, априори предусмотренных и хорошо формализованных целей*.

Теперь мы можем сказать, что именно для СИУ с целеполаганием мы и зарезервировали антропоморфный, эмоциональный и претендиозный, но в таком случае, по-видимому, оправданный термин «интеллектуальная система управления». Такое использование термина согласуется также с англо-язычной терминологией соответствующей области: именно термином «intelligent», а не «intellectual», сегодня предпочитают именовать системы управления и их компоненты.

Соответственно приведенной ранее качественной шкале возрастания потенциала решения задач управления, многоуровневая организация сложных систем управления иллюстрируется на рис. 7.

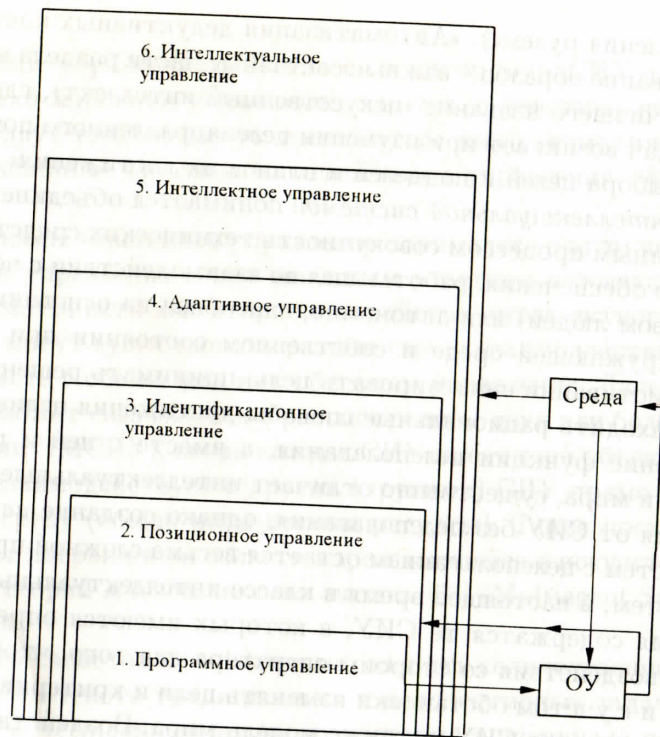


Рис. 7. Многоуровневая организация сложных систем управления

Представленная структура соответствует концепции иерархического управления, которая наблюдалась и широко наблюдается в работе [61].

Иерархии управлений, пришедшие еще из работ 60-х гг. по самоорганизующимся системам, базировались на многоуровневом управлении систем [62]. В соответствии с упомянутым выше четвертым принципом организации СИУ, рассматриваются три уровня управления [63]. Верхний уровень – организация, средний уровень – координация и нижний – исполнение. Управляющая подсистема на верхнем уровне управляет процессом как обобщенным целым, а компоненты системы управления на нижнем уровне «фокусируются с большим разрешением» на подпроцессах (подлежащих координации). С дру-

стороны, управляющая подсистема верхнего уровня является нелинейной, так как имеет дело с процессом на уровне лингвистического описания; управляющая подсистема нижележащего уровня – более сложна и т.д.

Такая структура иерархической системы управления, по-видимому, аналогична структуре функционирования мозга и является результатом декомпозиции задач с постепенным фокусированием внимания на более мелких деталях.

Заметим, что в литературе известна другая классификация систем управления [64] – по объему необходимой информации о внешнем мире. В соответствии с ней различаются:

- простые системы управления (F-системы), в которых при любой наблюдаемой ситуации заранее определено, как будет выработываться решение. Иначе говоря, при этом в системе управления есть априорно заложенная функциональная связь: ситуация – алгоритм выработки решения. В структуре системы используются только априорные знания об объекте управления и среде его функционирования;

- системы с адаптацией (F-A-системы), в которых предусмотрен механизм подстройки алгоритма выработки решений под изменяющиеся условия работы объекта управления. В структуре таких алгоритмов, кроме априорных, используются апостериорные знания об объекте управления и среде его функционирования;

- модельные системы управления (F-M-системы) содержат блок «знания модель мира», являющийся совокупностью необходимых для управления знаний об объекте управления и о среде его функционирования;

- семиотические системы (S-системы) содержат блок «интерпретатор», который из наблюдаемых (в процессе функционирования объекта управления) фактов выделяет «причинно-следственные цепочки» и обнаруживает закономерности. Центральная проблема здесь – построение «модели мира», «интерпретатора» и процедур их взаимодействия.

Нетрудно видеть, что F- и F-A-системы соответствуют на рис. 7 системам с уровнями управления 1, 2 и 3, 4 соответственно.

Если считать, что СИУ без целенаправленного, хотя и используют

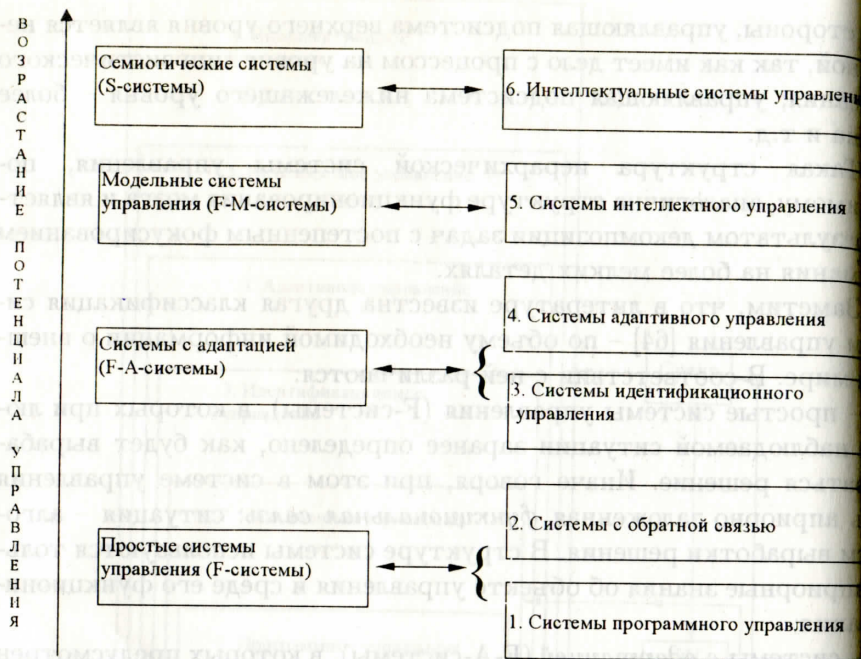


Рис. 8. Соответствие классов систем управления в двух классификациях.

развитую «знаниевую» модель мира, но эта модель в основном дана проектировщиком или допускает изменения, но лишь в предусмотренной им заранее, то F-M-системы соответствуют СИУ 5-го уровня. Если, к тому же, считать, что семиотические системы активно строя и перестраивая модель мира, способны к функциям целеполагания, то S-системы соответствуют СИУ 6-го уровня, то есть интеллектуальным системам управления. В целом же, взаимное соответствие систем в рассмотренных классификациях представлено на рис. 8.

Известна также классификация уровней и соответствующих алгоритмов управления в следующем глобальном аспекте. Различают три (всегда объективно существующие) уровня управления [65]:

– верхний уровень управления (ВУУ): *целеполагание*,

– средний уровень управления (СУУ): *поиск способа достижения оставленной на верхнем уровне цели*,  
– нижний уровень управления (НУУ): *реализация выбранного на среднем уровне способа достижения поставленной цели*.

В настоящее время, как было отмечено выше, СИУ с нетривиальным верхним уровнем управления существуют только в форме человеко-машинных систем.

Рассмотрим алгоритмическую (аппаратную) обеспеченность уровней ВУУ-СУУ-НУУ [66–69]. В современных человеко-машинных супервизорных, антропоцентрических) системах управления аппаратно-алгоритмически поддерживается главным образом нижний уровень; проблемы этого уровня хорошо разрешаются с помощью алгоритмов традиционной структуры, хотя, как мы видели в п.п. 1, 2, применение интеллектуальных компонент управления возможно и целесообразно даже на НУУ. Проблемы среднего и особенно верхнего уровней уже выходят за пределы возможностей алгоритмов традиционных структур; по своей природе они ближе к тем интеллектуальным задачам, которые для своего решения с необходимостью требуют привлечения методов искусственного интеллекта.

Ограниченность структуры традиционного бортового алгоритмического и индикационного обеспечения, поддерживаемого бортовыми вычислительными машинами, на фоне разнообразия структуры алгоритмов деятельности членов экипажа осознается уже не только теоретиками, но и инженерами-исследователями, непосредственно проектирующими технические объекты. Таким образом, проблема аппаратно-алгоритмического обеспечения уровней СУУ и, в особенности, ВУУ является вызовом для специалистов в области интеллектуального управления.

## Заключение

Ареал применения средств искусственного интеллекта к задачам всех уровней управления постоянно расширяется. Относительные неудачи кавалерийских атак на глобальные проблемы типа Универсального Решателя Задач (General Problem Solver [70]) предсказаны

классическими отрицательными результатами [39, 40] и объясняются в теории сложности алгоритмов. Эти неудачи побудили к более тонким и глубоким исследованиям и специализации логических и других подходов к тем или иным классам задач.

На повестке дня создание полностью автоматических систем интеллектуального управления. Достижения в области автоматизации логического вывода, индуктивного логического программирования, порождения гипотез, распознавания образов и др. уже вызывают жизнь ряд амбициозных проектов, в том числе, например, проекты создания полностью автоматических пилотов [71].

Вместе с тем, не должно быть неоправданного обобщения в оценке будущих перспектив использования интеллектуального управления как это уже было в прошлом в искусственном интеллекте (см. [2, 1]). Требуются новые идеи и решения, в том числе развивающие и интегрирующие перспективные и уже сегодня полезные методы, упомянутые в этом обзоре. Приложения и экспериментальные следования должны помочь сакцентировать и/или скорректировать направления прогресса в области интеллектуального управления.

### Список литературы

- [1] Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению, I // Интеллектуальные системы. 1999. Т. 4. Вып. 1-2.
- [2] Driankov D., Hellendoorn H., Reifrank M. An Introduction to Fuzzy Control. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1993.
- [3] Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к понятию приближенных решений // В серии: Математика. Новое в зарубежной науке / Под ред. А.Н. Колмогорова, С.Новикова. М.: Мир, 1976.
- [4] Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990.
- [5] Moore C.G., Harris C.J. Indirect Adaptive Fuzzy Control // International J. of Control. 1992. 56. №2.

- [6] Procyk T.J., Mamadani E.H. A Linguistic Self-Organising Process Controller // Automatica. 1979. 15.
- [7] Passino K.M. Toward Bridging the Perceived Gap between Conventional and Intelligent Control / M.M. Gupta, N.K. Sinha (eds.). New York: IEEE Press, 1996.
- [8] Passino K.M., Lunardhi A.D. Stability Analysis of Expert Control Systems // Proc. IEEE Conference on Decision and Control. 1993.
- [9] Imasaki N., Nishida S. Positioning Control for a Space Manipulator System Using Fuzzy Control Method // Toshiba's Selected Papers on Science & Technology. 1992. 4. №1.
- [10] White D., Bowers A., Iliff K., Noffz G., Gonda M., Menousek J. Flight, Propulsion and Thermal Control of Advanced Aircraft and Hypersonic Vehicles // Handbook of Intelligent Control. Neural, Fuzzy, and Adaptive Approaches / D.A. White, D.A. Sofge (eds.). New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [11] Kiszka J.B., Gupta M.M., Nikiforuk M.N. Energetic Stability of Fuzzy Dynamic Systems // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. 1985. 15.
- [12] Glas M. de. Invariance and Stability of Fuzzy System // J. Math. Analysis Appl. 1984. 199.
- [13] Robinson J.A. A Machine-Oriented Logic Based on the Resolution Principle // J.ACM. 1965. 12. / русский перевод: Робинсон Д. Машинно-ориентированная логика, основанная на методе резолюции // Киберн. сб. Нов. сер. Вып. 7. М.: Мир, 1970.
- [14] Васильев С.Н. Метод сравнения в анализе систем, I-IV // Дифференциальные уравнения. 1981. 17. №9, 11. 1982. 18. №2, 6.
- [15] Васильев С.Н., Гулямов Ш.Б., Жерлов А.К., Литвинов Ю.Ф. О логических средствах системы планирования вычислений «ПА-САД» // Алгоритмы. ИК АН УзССР, Ташкент: ИК АН УзССР, 1986. Вып. 66.
- [16] Vassilyev S.N. Machine Synthesis of Mathematical Theorems // J. of Logic Programming. 1990. 9. №2, 3.

- [17] Васильев С.Н., Жерлов А.К. Логическое моделирование и управление в реальном времени // Материалы Всесоюзной научной технической конференции «Интеллектуальные системы в машиностроении» / Под ред. В.А. Виттиха. Самара, 1991. Ч. 2.
- [18] Васильев С.Н., Жерлов А.К. Об исчислениях типово-квантовых формул // Доклады РАН. 1995. 343. №5.
- [19] Vassilyev S.N. Modelling Logical Derivation and Hypothesis Generation // Proc. IEEE Symposium on Modelling, Analysis and Simulation, CESA'96 IMACS Multiconference. 1996. V.1.
- [20] Walther C. A Mechanical Solution of Schubert's Steamroller Many-Sorted Resolution // Proc. 4th National Conference on Artificial Intelligence. 1984.
- [21] Vassilyev S.N. Logical Approach to Control and Applications // Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications. 1997. №4.
- [22] Butyrin S.A., Makarov V.P., Mukumov R.R., Somov Ye.I., Vassilyev S.N. An Expert System for Design of Spacecraft Attitude Control Systems // J. Artificial Intelligence in Engineering. 1997. №11.
- [23] Васильев С.Н., Черкашин Е.А. Интеллектуальное управление лескопомом // Сибирский журнал индустриальной математики. 1998. 1. №2.
- [24] Nerode A., Kohn W. Models for Hybrid Systems: Automata, Topologies, Controllability, Observability // Hybrid Systems / R.L. Grossman, A. Nerode, A.P. Ravn, H. Rischel (eds.). Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 1993.
- [25] Жук К.Д., Тимченко А.А., Даленко Т.И. Исследование структуры и моделирование логико-динамических систем. Киев: Наукова Думка, 1975.
- [26] Бортаковский А.С. Достаточные условия оптимальности управления детерминированными логико-динамическими системами // Информатика. Автоматизация проектирования. М.: ВИМ. 1992. Вып. 2-3.

- [7] Васильев С.Н., Кузнецов П.К., Лакеев А.В. К общей теории интегро-операторного уравнения динамики переключаемых схем // Доклады РАН. 1996. 348. №4.
- [8] Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.: Наука, 1969.
- [29] Варшавский В.И. Коллективное поведение автоматов. М.: Наука, 1973.
- [30] Закревский А.Д. О корректности параллельных алгоритмов логического управления // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1987. №4.
- [31] Юдицкий С.А., Покалев С.С. Логическое управление гибким интегрированным производством. Препринт ИПУ. М., 1989.
- [32] Авакян В.В., Юдицкий С.А. Описание и анализ параллельных алгоритмов логического управления с применением графов операций // Автоматика и телемеханика. 1990. №1.
- [33] Stankovic J.A., Ramamritham A. Hard Real-Time Systems: A Tutorial. Washington, D.C.: Computer Society Press (IEEE), 1988.
- [34] Dean T., Boddy M. An Analysis of Time-Dependent Planning // Proc. 7th National Conference on Artificial Intelligence. 1988.
- [35] Zilberstein S. Operational Rationality through Compilation of Anytime Algorithms. PhD Thesis. Univ. of California. Berkeley, 1993.
- [36] Кухтенко А.И. Кибернетика и фундаментальные науки. Киев: Наукова Думка, 1987.
- [37] Subramanian D., Greiner R., Pearl J. The Relevance of Relevance // Artificial Intelligence. 1997. 97.
- [38] Levy A.Y., Fikes R.E., Sagiv Y. Speeding up Inferences Using Relevance Reasoning: A Formalism and Algorithms // Artificial Intelligence. 1997. 97.
- [39] Church A. A Note on the Entscheidungsproblem // J. Symbolic Logic. 1936. 1.
- [40] Turing A.M. On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem // Proc. Lond. Math. Soc. Ser. 2. 1936. 42. 1936. 43.

- [41] Глушков В.М. Электронные машины и автоматизация умственного труда // Кибернетика – неограниченные возможности, возможные ограничения. Итоги развития. М.: Наука, 1979.
- [42] Васильев С.Н. Метод синтеза условий выводимости хорнов и некоторых других формул // Сибирский математический журнал. 1997. 38. №5.
- [43] Laird J.E., Newell A., Rosenbloom P.S. SOAR: An Architecture for General Intelligence // Artificial Intelligence. 1987. 33. №1.
- [44] Mitchell T.M. Becoming Increasingly Reactive (Mobile Robots) // Proc. 8th National Conference on Artificial Intelligence. 1990. 2.
- [45] Russell S.J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach // Prentice-Hall, Inc., 1995.
- [46] Gabbay D.M. Classical vs Non-classical Logics (The Universality of Classical Logic) // Handbook of Logic in Artificial Intelligence and Logic Programming / D.M. Gabbay, C.J. Hogger, J.A. Robinson (eds.). Oxford: Clarendon Press, 1994.
- [47] Мукаидоно М. Нечеткий вывод резолюционного типа // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р. Ягера. М.: Радио и связь, 1986.
- [48] Farinas del Cerro L. Resolution Modal Logic // Logique et Analyse. 1985. 28. №110–111.
- [49] Mints G. Gentzen – type Systems and Resolution Rules: Part I. Propositional Logic // COLOG-88, Lecture Notes in Computer Science. 1990. V. 417; Part II. Predicate Logic // Lecture Notes in Computer Science. Mathematical Logic. V. 2.
- [50] Walther C. A Many-Sorted Calculus Based on Resolution and Paramodulation // Proc. 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1983.
- [51] Blackburn P., de Rijke M. Why Combine Logics? // Studia Logica. 1997. 59.
- [52] Finger M., Gabbay D.M. Combining Temporal Logic Systems // Notre Dame Journal of Formal Logic. 1996. 37.

- Eiben G., Kurucz A., Janossy A. Combining Logics via Combining Algebraic Theories // Notre Dame Journal of Formal Logic. 1996. 37.
- Tsuji S., Amano M., Hikita S. Application of the Expert System to Elevator Group-Supervisory Control // Proc. 5th Conference on Artificial Intelligence for Applications. 1989.
- Åström K.J., McAvoy T.J. Intelligent Control: An Overview and Evaluation // Handbook of Intelligent Control. Neural, Fuzzy, and Adaptive Approaches / D.A. White, D.A. Sofge (eds.). New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: основные понятия и определения // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. №3.
- Saridis G.N. Analytical Formulation of the Principle of Increasing Precision with Decreasing Intelligence for Intelligent Machines // Automatica. 1989. 25. №3.
- Городецкий В.И. Многоагентные системы: основные свойства и модели координации поведения // Информационные технологии и вычислительные системы. 1998. №1.
- Глушков В.М. Кибернетика // Математическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1979. Т. 2.
- Пупков К.А. Некоторые результаты разработки научно-технической программы «Интеллектуальные системы» Федеральной комплексной программы «Университеты России» // Труды 2 Международного симпозиума «ИНТЕЛС'96», «Интеллектуальные системы» / Под ред. К.А. Пупкова. 1996. Т. 1.
- Охочимский Д.Е., Платонов А.К. Алгоритмы управления шагающим аппаратом, способным преодолевать препятствия // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1973. №5.
- Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973.
- Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления. М.: Наука, 1980.

- [64] Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоиздат, 1981.
- [65] Моисеев Н.Н. Теория управления и проблема «человек – создающая среда» // Вестник АН СССР. 1980. №1.
- [66] Федосов Е.А. Критические технологии России // Труды Всесоюзной конференции Государственных научных центров. М., 1995.
- [67] Федунев Б.Е. Проблемы разработки бортовых операционных систем для антропоцентрических объектов // РАН. Теория и системы управления. 1996. №5.
- [68] Позняков П.В., Федунев Б.Е. Основы информационной интеллигентности бортовой аппаратуры. М.: МАИ, 1993.
- [69] Федунев Б.Е., Романова В.Д., Юневич Н.Д. Бортовые операционно-советующие экспертные системы на борту антропоцентрических человеко-машинных объектов // Интеллектуальные системы. М., 1996. Т. 1. Вып. 1–4.
- [70] Newell A., Simon H.A. GPS, a Program that Simulates Human Thought // Lernende Automaten / H. Billing (ed.). R. Oldenbourg, Munich, 1961.
- [71] Kohn W. Declarative Control Architecture // Communications of the ACM. 1991. 34. №8.

## О функциональной модели когнитивного процесса

С.С. Магазов

В последнее время значительно возрос интерес к методам обработки плохо структурированных, динамически меняющихся информационных массивов большого объема. Примерами таких массивов могут служить: информационный поток, идущий от устройств непрерывного ввода изображений; базы данных, полученные в результате работы различных систем мониторинга и т.д. Возникает проблема, каким образом сделать большой объем быстроменяющейся информации обозримым для человека.

Классические методы работы с информацией, такие как статистический анализ и распознавание образов, изначально были ориентированы на решение задач обработки данных измерений, имеющих числовую природу. Эти методы не позволяют решать возникшие в информационной технологии проблемы обработки плохо структурированной динамической нечисловой информации. Поиск новых технологий, позволяющих обрабатывать большие объемы динамической информации, становится приоритетной задачей научных исследований, и нет числа научным конференциям, посвященным этим проблемам. Перспективной представляется технология, построенная на идеях эпистемологии и когнитологии, которые предлагают рассматривать информационный массив как своеобразный виртуальный информационный универсум и исследовать его подобно тому, как познается реальный мир. Перенос методов, разработанных в когнитивном моделировании, не может быть осуществлен механически. Моделирование процесса исследования физической реальности и методы исследования информационного универсума как такового имеют существенные различия.