

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА · 1993

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

УДК 658.012.011.56

© 1993 г. В. Н. ЗАХАРОВ, С. В. УЛЬЯНОВ

НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ. III. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Обсуждаются проблемы проектирования промышленных регуляторов и систем управления с различной степенью интеллектуальности. Отмечается несовершенство существующих средств программно-аппаратной поддержки процессов управления с использованием знаний и методов проектирования интеллектуальных управляющих систем. Подчеркивается необходимость разработки специальной методологии проектирования управляющих систем такого класса. Предлагаются основы методологии проектирования многоуровневых интеллектуальных САУ. Анализируются особенности проектирования управляющих систем, интеллектуальных «в большом» и «в малом». Приведены многочисленные примеры проектируемых систем.

Введение. С целью улучшения оценок адекватности формализации моделей и повышения эффективности функционирования регуляторов и систем автоматического управления (САУ) в условиях неопределенности информации о динамическом поведении сложных объектов управления или о внешней среде в традиционные методы проектирования уже давно включают качественные признаки при описании моделей процессов управления. Введение в процессы проектирования качественных признаков динамического поведения слабо структурированных объектов управления приводит к необходимости использования неклассических критериев оптимизации [1]. Обычно к качественным признакам относятся такие понятия, как грубость, чувствительность, устойчивость, адаптация и др. [1—3]. Учет и проверка таких качественных признаков при проектировании регуляторов и САУ позволяют существенно снизить требования к формированию и исследованию неклассических критериев оптимизации [1—3]. Поиск экстремума по неклассическим критериям оптимизации приводит к необходимости исследования аналогов логико-динамических моделей процессов управления [1, 3, 4] с последующей их лингвистической аппроксимацией [5, 6].

Анализ результатов имитационного моделирования и практического применения качественных признаков в лингвистической аппроксимации конкретных структур нечетких регуляторов и САУ подтвердил высокую эффективность новой интеллектуальной технологии при создании гибких мобильных систем управления сложными (слабо структурированными) промышленными объектами [3, 5—26]. Синтез разнообразных методов проектирования и эксплуатация разработанных коммерческих образцов нечетких регуляторов и САУ [5, 18, 23—29] показали, что методология проектирования и средства программно-аппаратной поддержки подобных интеллектуальных систем находятся на начальной стадии развития [30].

При создании инженерных методов проектирования проблемно-ориентированных систем управления, основанных на знаниях (в общем случае, на основе

нечетких экспертных систем [31, 32] как интеллектуальных «в большом» [5]), выяснилось, что с учетом особенностей условий применения разрабатываемые процессы проектирования требуют дополнительных исследований и специальных теоретических обоснований. Примером может служить попытка философского переосмысления связи нечеткой логики с японской трактовкой метафизики «иррациональной» логики, а также с интерпретацией традиционной символики Тай-дзы и принципами проектирования [25].

Данная статья, являющаяся продолжением [5], посвящена вопросам разработки специальной методологии и принципов организации процессов проектирования нечетких систем управления, основанных на знаниях. Приведены примеры систем, иллюстрирующие некоторые особенности предлагаемой методологии.

1. Методология проектирования интеллектуальных САУ. Основным предметом исследований в области промышленных интеллектуальных систем управления являются вопросы разработки многоуровневых архитектур управляющих систем, основанных на знаниях [33—35], с соответствующей классификацией проблемно-ориентированных задач промышленной автоматизации [36]; вопросы рационального построения баз знаний и эффективных аналитических моделей процессов управления, основанных на использовании знаний [37], согласно сформулированным в [5] принципам организации структур интеллектуальных управляющих систем и введенным там же уровням интеллектуализации САУ. Для решения перечисленных задач требуется специальная методология проектирования систем такого класса.

Основу предлагаемой методологии составляют процедуры выбора средств интеллектуализации для решения задачи обеспечения требуемого динамического поведения САУ в тех случаях, когда традиционными средствами улучшения динамики поведения системы эту задачу решить нельзя. В таких случаях прибегают к средствам, основанным на использовании знаний. Причем выбранные интеллектуальные средства используются с целью преодоления неопределенности информации об окружающем внешнем мире (среде) или об управляемом объекте (о его поведении). Следует подчеркнуть, что в процессе поиска требуемой формы поведения задачу улучшения динамических характеристик системы можно решить различными путями: либо повышением качества управления за счет применения традиционных методов (выбор более сложной модели САУ на исполнительном уровне) с использованием простых средств интеллектуального уровня, либо, напротив, путем разработки эффективных интеллектуальных средств, улучшающих характеристики простой модели исполнительного уровня. В первом случае усложняется модель исполнительного уровня за счет аппаратной реализации функций изменений качественных признаков описания процесса управления. Во втором случае модель исполнительного уровня может быть выбрана более простой за счет повышения интеллектуального уровня САУ и реализации программным способом изменений качественных признаков описания процесса управления, основанного на использовании знаний [38, 39]. Таким образом, задача выделения функций управления, реализуемых на самом нижнем подуровне исполнительного уровня [5], должна быть решена на начальном этапе проектирования.

Следовательно, основу методологии проектирования многоуровневых интеллектуальных САУ могут составлять два метода: метод формирования (вычленения) моделей исполнительного уровня (за счет выделения адекватных функций управления) и метод согласования (или координации) исполнительных и интеллектуальных подуровней. При этом способ выделения вначале простейших моделей может оказаться (при соответствующем расширении) полезным при решении задачи выбора адекватных интеллектуальных подуровней [39].

Метод координации (согласования) исполнительных и интеллектуальных подуровней проиллюстрирован на рис. 1. В левой части рис. 1 указаны исполнительные уровни, а в правой части — интеллектуальные уровни построения моделей САУ. Из рис. 1 видно, что меры соответствия могут быть установлены различным образом. Каждый из выбранных вариантов определяет сложность используемого

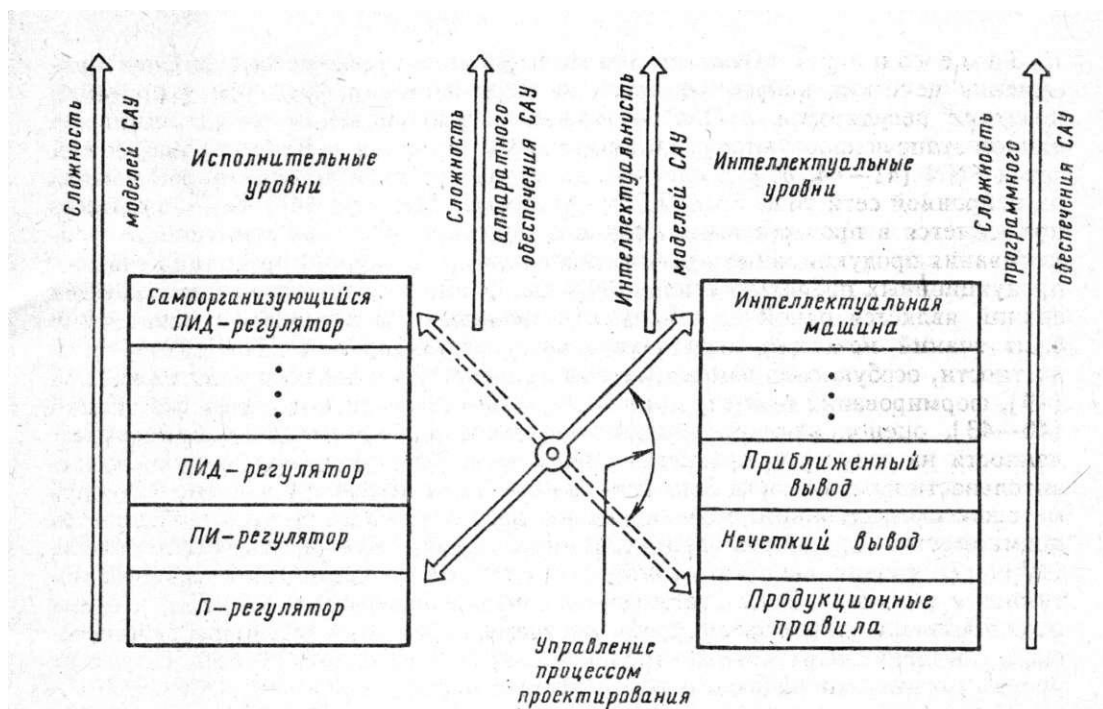


Рис. 1. К методологии проектирования структур САУ (на исполнительном и интеллектуальном уровнях)

аппаратного и программного обеспечения, а окончательный вариант выбора модели САУ осуществляется по результатам имитационного моделирования проектируемой системы.

Обсуждаемый подход к построению методологии проектирования интеллектуальных САУ включает в себя также: оценку эффекта влияния введения уровня интеллектуальности на функциональные возможности процессов управления; классификацию САУ, основанных на знаниях, по сложности решаемых задач управления; выявление роли базы знаний (с оценкой полноты) при разделении функций между исполнительным и интеллектуальным уровнями; вычленение структур САУ на исполнительном уровне минимальной сложности при заданном уровне интеллектуальности (задача анализа) и наоборот (задача синтеза); решение задачи агрегирования и декомпозиции структур САУ, основанных на знаниях (как на исполнительном, так и на интеллектуальном уровнях).

В разрабатываемой методологии особую роль приобретают методы имитационного моделирования нечетких моделей промышленных САУ на нейронных нечетких сетях типа FNN (Fuzzy Neural Networks) [40—44] с целью извлечения экспертной информации из динамики нечеткого поведения объекта управления для формирования соответствующих баз знаний и построения функций принадлежности исследуемых нечетких отношений «вход — выход». Следовательно, в этом случае рассматриваются две фазы построения нечетких моделей интеллектуальных САУ. Первая фаза — имитационного моделирования — дает возможность установить нечеткие отношения «вход — выход» за счет организации процессов обучения и адаптации на FNN, сформировать структуру базы знаний САУ с механизмами нечеткого логического вывода. Такую фазу часто называют обучающей фазой [45]. Совместно с нечеткими алгоритмами идентификации [46, 47] и моделями нелинейной нечеткой регрессии [48] осуществляется процедура корректной формализации описания процесса управления исследуемого нечеткого объекта. Вторая фаза осуществляет проектирование и реализацию нечетких моделей регуляторов и САУ, на которой структурированные знания используются в процессах управления [5, 6].

З а м е ч а н и е 1. Отметим некоторые дополнительные особенности применения нечетких нейронных сетей на первой стадии фазы проектирования нечетких регуляторов и САУ в рамках разрабатываемой методологии. На данном этапе используются различные методы обучения на нечетких нейронных сетях FNN [41—44, 49]. В частности, модель нечеткой ассоциативной памяти на нейронной сети типа FAM (Fuzzy-Associative-Memory) [44, 49] эффективно применяется в процессе имитационного моделирования для адаптивного формирования продукционных правил типа «если..., то...». Формирование нечетких продукционных правил на основе FNN как форма извлечения и представления знаний является одной из широких разновидностей алгоритмов пополнения базы знаний нечетких интеллектуальных регуляторов и САУ [49—54]. В частности, особую роль данные методы приобретают в задачах идентификации [49], формирования процедур оценки чувствительности и полноты баз знаний [40—43], оценок влияния внешних факторов и информационной неопределенности на структуру процессов управления. Так, например, оценки чувствительности и робастности базы знаний нечетких контроллеров можно получить методом имитационного моделирования на FNN, когда в FAM добавляется подмножество случайных продукционных правил или иначе «саботажных» (sabotage) правил нечеткого логического вывода со сниженным уровнем истинности суждения. Результаты моделирования показывают [51, 55], что при использовании первой фазы проектирования свойство робастности динамического поведения нечеткого контроллера сохраняется вплоть до 50% снижения уровня истинности нечеткого логического вывода.

Эффективное применение методов FNN в задачах управления сложными робототехническими системами отражено в [40—44, 55—58].

О п р е д е л е н и е [39]. Методология проектирования многоуровневых интеллектуальных САУ, основанная на последовательном (возможно, многократном) применении методов формирования (вычленения) и согласования (координации), выполняемых по результатам оценок имитационного моделирования, называется методологией проектирования FZUP-систем (или FZUP-методологией).

В системах проектирования структур нечетких регуляторов и САУ широкое применение находит аппаратно-программная поддержка процедур разработки на основе нечетких процессоров, нечеткой памяти и нечетких триггеров [5, 59—69]. Развитие микроэлектронной технологии и методологии организации вычислительного процесса [70] позволило создать принципиально новый вид нечеткого процессора [71], использующего квантово-механические переходы Джозефсона. Такой подход позволяет существенно увеличить скорость логического вывода и объем требуемой памяти хранения продукционных правил. Примером аппаратного обеспечения FNN может служить разработка FAM [72] для реализации процессов управления на основе гибридного подхода нейро- и нечеткой технологий к процессам проектирования [73—75].

Развитие процессов проектирования интеллектуальных систем потребовало соответствующего программного обеспечения [76]. Известны разработанные программные средства проектирования и поддержки нечетких контроллеров и САУ с различной проблемной ориентацией [5, 77].

К программным средствам поддержки процессов проектирования интеллектуальных регуляторов и САУ можно отнести экспертные системы (ЭС), используемые в качестве специальной инструментальной интеллектуальной надстройки САПР в рамках методологии проектирования, представленной на рис. 1. Исследование общих принципов построения интеллектуальных машин [78] и их взаимосвязь с процессами управления [78, 79], а также последующее развитие когнитивных процессов проектирования систем управления, функционирующих в условиях неопределенности различной физической (информационной) природы, привели к необходимости повышения качества управления за счет использования баз знаний активных ЭС, входящих в этом случае в состав модели проектируемого УО [80—82].

Анализ качественных особенностей динамического поведения объектов управления и предельных возможностей информационных процессов управления [3, 4] в сочетании с методами идентификации моделей, обучения и адаптации показали большое разнообразие в построении методологии проектирования САУ, основанных на различного уровня структурированных знаниях и иерархии структур самих САУ [83—96].

Дополнительный анализ прикладных методов исследования и имитационного моделирования систем, основанных на знаниях, подтвердил [79, 97, 98] плодотворность сочетания традиционных методов теории автоматического управления с методами теории интеллектуальных систем и когнитивных процессов. При этом анализ и синтез самих интеллектуальных систем управления стало удобно проводить традиционными методами теории управления (например, оценки робастности, чувствительности и устойчивости динамического поведения интеллектуальных САУ к изменению продукционных правил в базе знаний и т. п. [88—93, 99—103]). Оценки качественного анализа динамического поведения интеллектуальных САУ в сочетании с имитационными процессами моделирования на нейронных сетях составляют, в свою очередь, основу для формирования базы знаний выбора соответствующих законов управления в ЭС для систем управления [79, 104] и установления адекватности моделей реальному объекту в задачах идентификации процессов управления [95, 96].

З а м е ч а н и е 2. Совместное использование методов имитационного моделирования на нейронных сетях и разработки интеллектуальных САУ на основе когнитивных процессов приводит к новому классу САУ, интеллектуальных «в большом» — когнитивным регуляторам и системам управления [79, 105—108]. Такие регуляторы в частном случае (при использовании только одной нечеткой нейронной сети типа FNN на основе FAM) переходят в класс нечетких контроллеров и САУ [107, 109]. Дальнейший прогресс развития и применения СБИС в нечетких процессорах на нечетких триггерах приводит к совершенствованию программно-аппаратного обеспечения подобных когнитивных регуляторов и созданию специализированных аппаратных средств [110]. Использование таких когнитивных регуляторов, интеллектуальных «в большом», дает возможность существенно повысить мобильность автономных роботов.

2. Примеры использования активных ЭС в задачах моделирования интеллектуальных регуляторов. В качестве иллюстративного примера сравним результаты имитационного моделирования динамического поведения простого объекта управления, в контуре управления которого использовались традиционный ПИД-регулятор и регулятор с активной ЭС. Согласно методологии проектирования, представленной на рис. 1, такая ситуация соответствует случаю нижнего исполнительного уровня и верхнего уровня координации управления.

П р и м е р 1. В качестве модели объекта управления, описывающей реальный процесс подачи углерода в доменную печь [111], рассматривается линейная система с запаздыванием с передаточной функцией следующего вида:

$$\Phi(s) = \frac{0.63 \exp(-s)}{(33.5s + 1)}. \text{ Целью исследования являлось определение реакции данного}$$

объекта управления на типовые динамические воздействия при различных законах и критериях управления. В первом случае использовался ПИД-регулятор. Оптимальный выбор параметров ПИД-регулятора осуществлялся по критерию минимума

$$Q(n) = \min \sum_{i=1}^m e^2(i)T_s, \text{ используя методику [111] в виде выбора закона управления } u(n) = u(n-1) +$$

$+ k_e e(n) + k_d \Delta e(n)$. Параметры k_i и k_j определялись из критерия минимизации функционала стоимости типа

$$P[k_i(n) + \Delta_1, k_j(n) + \Delta_2] = P[k_i(n+1), k_j(n+1)] = \min \left[e^2(n+1) + \sum_{i=1}^m Q(i) \right],$$

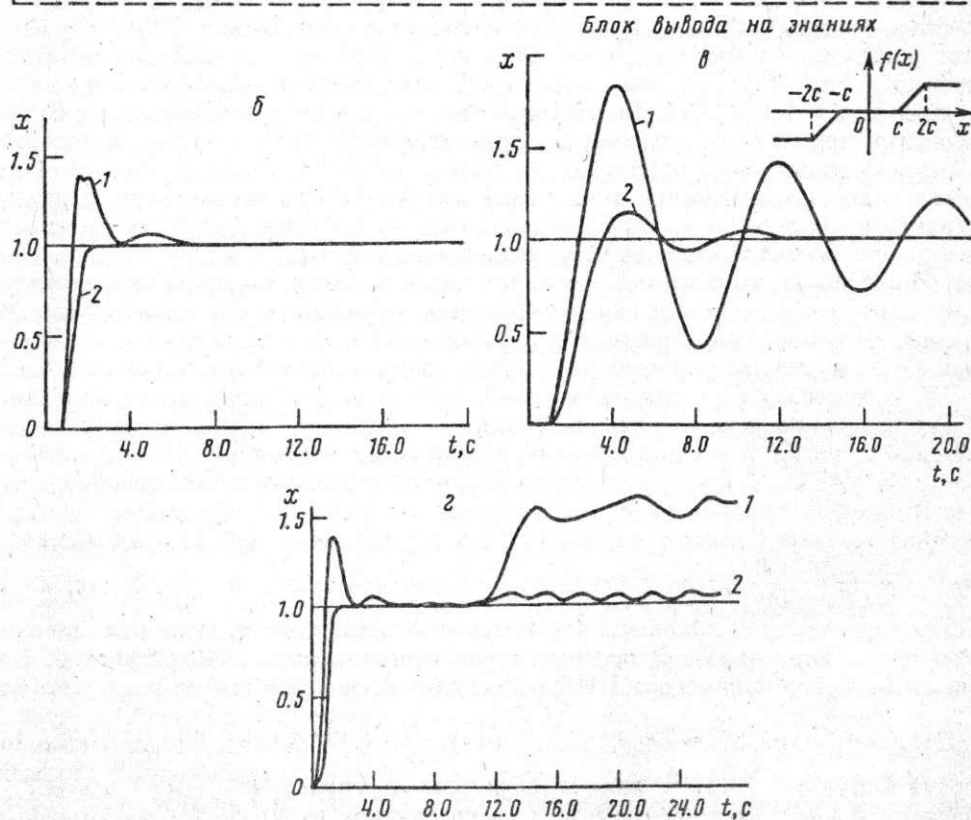
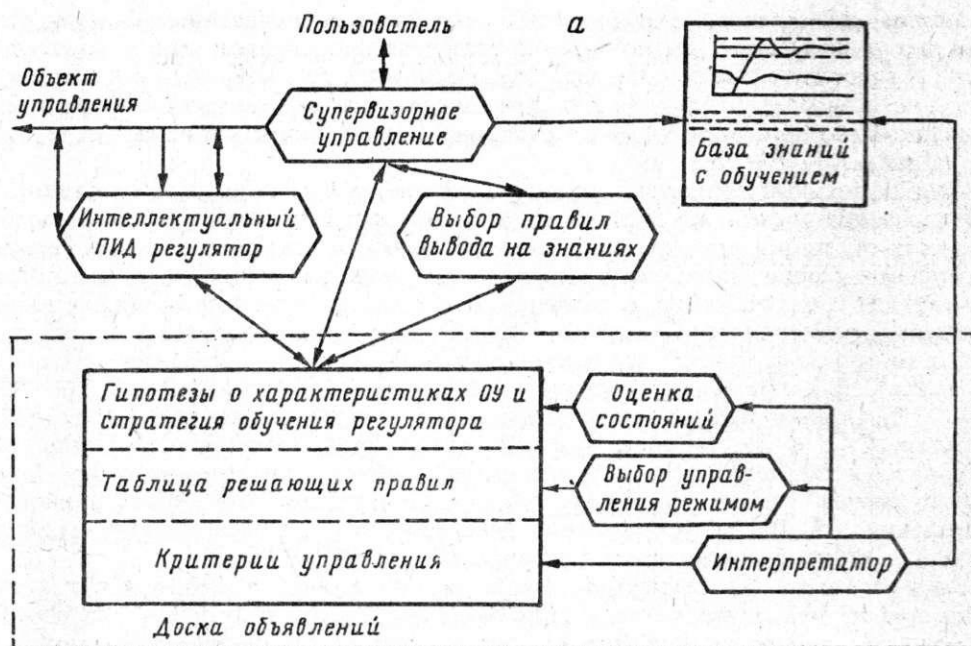


Рис. 2. Моделирование динамического поведения управляемого объекта (1 — ПИД-регулятор; 2 — интеллектуальный регулятор с ЭС): а — блок-схема ЭС для моделирования процессов управления в реальном времени; б — переходные процессы линейного ОУ с задержкой при ступенчатом воздействии; в — переходные процессы нелинейного ОУ; з — переходные процессы линейного ОУ при случайных воздействиях

где P — функционал стоимости, Δ_1 — приращение по k_1 , Δ_2 — приращение по k_2 .

Типовая структурная схема моделирования динамического поведения объекта управления (ОУ) на основе использования активных ЭС представлена на рис. 2, а [112]. База данных данной ЭС содержит сведения об экспериментальных данных измерений реальных характеристик динамического поведения исследуемого ОУ (типа: время переходного процесса, время запаздывания, величина перерегулирования, время перерегулирования, амплитуда переходного процесса и т. п.), о видах критериев и законах управления, граничных величинах, характеризующих устойчивость ОУ (из блока вывода на знаниях рис. 2, а), результаты имитационного моделирования и т. д. Такие активные ЭС для процессов управления относятся к ЭС второго поколения с глубинным представлением знаний [88, 89, 104], структура и функции которых описаны в [113]. Механизм логического вывода (в блоке выбора правил логического вывода на рис. 2, а) использует три модификации решающих (продукционных) правил: 1) используется текущий алгоритм управления, удовлетворяющий требуемому критерию управления или некоторые параметры алгоритма управления требуют модификации; 2) выбирается новый алгоритм управления; 3) допускаются два или большее число алгоритмов управления. Такое допущение основано на гипотезе наличия широкого диапазона изменения ошибки или скорости ошибки на различных участках фазового портрета, приводящего к появлению системы с переменной структурой и использующей различные законы управления на данных участках фазового портрета [114]. Данные правила вывода и алгоритмы управления имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 R1: & \text{ если } (e_i > e_0), \text{ то } u_i = u_0; \\
 R2: & \text{ если } (e_i < e_1 \leq e_0), \text{ то } u_i = k_1 u_0; \\
 R3: & \text{ если } (-e_1 < e_i < -e_2), \text{ то } u_i = k_3 e_i(n) + k_6 \Delta e_i(n); \\
 R4: & \text{ если } (e_i < -e_1), \text{ то } u_i = k_1 u_0; \\
 R5: & \text{ если } (e_2 < e_i \leq e_1) \text{ и } |\dot{e}_i| \leq G_1, \text{ то } u_i = k_3 e_i(n) + k_4 \sum_{i=1}^j e_i(n); \\
 R6: & \text{ если } (e_2 < e_i \leq e_1) \text{ и } |\dot{e}_i| > G_1, \text{ то } u_i = k_2 e_i(n); \\
 R7: & \text{ если } (e_3 < e_i \leq e_2) \text{ и } |\dot{e}_i| \leq G_2, \text{ то } u_i = k_5 e_i(n) + k_6 \Delta e_i(n); \\
 R8: & \text{ если } (e_3 < e_i \leq e_2) \text{ и } (G_2 < |\dot{e}_i| \leq G_3), \text{ то } u_i = k_5 e_i(n) + k_6 \Delta e_i(n); \\
 R9: & \text{ если } (e_3 < e_i \leq e_2) \text{ и } |\dot{e}_i| > G_3, \text{ то } u_i = k_5 e_i(n) + k_6 \Delta e_i(n); \\
 R10: & \text{ если } (|e_i| \leq e_3) \text{ и } (e_i \cdot \dot{e}_i > 0 \text{ и } |\dot{e}_i| < G), \text{ то } u_i(n) = u_i(n-1) + k_7 e_i(n) + \\
 & + k_8 \Delta e_i(n); \\
 R11: & \text{ если } (|e_i| \leq e_3) \text{ и } (e_i \cdot \dot{e}_i > 0 \text{ и } |\dot{e}_i| > G), \text{ то } u_i(n) = u_i(n-1) + k_7 e_i(n) + \\
 & + k_8 \Delta e_i(n); \\
 R12: & \text{ если } (|e_i| \leq e_3) \text{ и } (e_i \cdot \dot{e}_i > 0 \text{ и } e_i \cdot \dot{e}_{i-1} > 0), \text{ то } u_i(n) = u_i(n-1) + k_7 e_i(n) + \\
 & + k_8 \Delta e_i(n); \\
 R13: & \text{ если } (|e_i| \leq e_3) \text{ и } (e_i \cdot \dot{e}_i > 0 \text{ и } e_i \cdot \dot{e}_{i-1} < 0), \text{ то } u_i(n) = u_i(n-1) + k_7 e_i(n) + \\
 & + k_8 \Delta e_i(n);
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где $e_0 > e_1 > e_2 > e_3$.

В (2.1) коэффициенты $e_0 + e_3$, $G + G_3$ — постоянные положительные величины (задаются на основе априорной информации и могут изменяться в процессе имитационного моделирования). Первая группа продукционных правил R1+R9 из (2.1) учитывает широкий диапазон изменения ошибки $e_i(n)$ и использует традиционный алгоритм управления П-, ПИ-регуляторов. Вторая группа правил R10+R13 учитывает динамику поведения ОУ и дифференциальные характеристики $\Delta u_i(n)$ процесса управления (малая величина перерегулирования, устойчивость динамических процессов и т. д. с проверкой логических условий в посылке

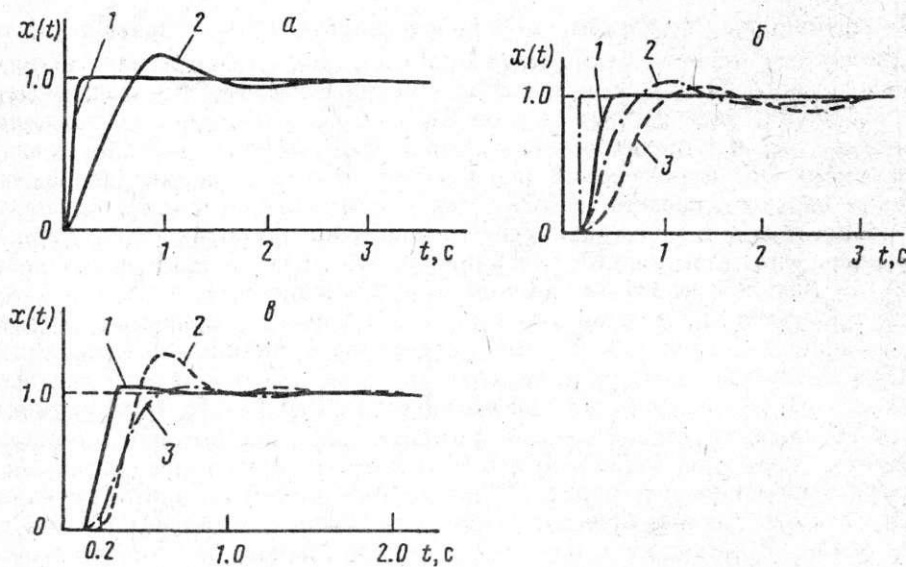


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования переходных процессов: а — переходные процессы в ОУ для интеллектуального (1) и логического (2) ПИД-регуляторов с передаточной функцией ОУ вида $\Phi = \exp(-0.05s)/(1.5s + 1)^2$; б — переходные процессы в ОУ для интеллектуального (1), логического (2) и традиционного (3) ПИД-регуляторов с передаточной функцией ОУ вида $\Phi = \exp(-1.5s)/(0.5s + 1)(0.4s + 1)$; в — переходные процессы для интеллектуального ПИД-регулятора при изменении вида передаточной функции ОУ: 1 — $\Phi = \exp(-0.15s)/(1.6s + 1)$; 2 — $\Phi = \exp(-0.2s)/(0.4s + 1)(0.45s + 1)$; 3 — $\Phi = \exp(-0.15s)/(0.4s + 1)$

«если...»), применяя алгоритм управления для ПИД-регулятора. Модели регуляторов, использующих в контуре управления подобные ЭС, получили название интеллектуальных регуляторов, основанных на экспертных знаниях типа EICS (Expert Intelligent Control System). На рис. 2, б приведены результаты имитационного моделирования реакции ОУ на ступенчатое воздействие; при наличии блока существенной нелинейности в ОУ с мертвой зоной реакция ОУ на ступенчатое воздействие приведена на рис. 2, в, а на рис. 2, г даны результаты моделирования при наличии аддитивного белого шума с единичной интенсивностью и нормальном законе распределения вероятностей. Из рис. 2, б видно, что реакция ОУ с EICS-регулятором стремится к идеальной характеристике с минимальной степенью и временем перерегулирования по сравнению с оптимизированным ПИД-регулятором. Из результатов моделирования следует также, что ОУ с EICS-регулятором менее чувствителен к наличию существенно нелинейных элементов (типа мертвой зоны), чем ОУ с ПИД-регулятором (см. рис. 2, в), и является робастным при наличии шумов в управляющем воздействии (см. рис. 2, г). Приведенный пример наглядно отражает роль наличия базы знаний и механизма логического вывода в интеллектуальных регуляторах, проектируемых по сформулированным принципам. Ряд других аналогичных примеров можно найти в [80—84, 86—94, 101—104, 112, 114].

Рассмотрим подробнее вопросы качественной оценки чувствительности и робастности интеллектуальных ПИД-регуляторов к изменению вида логических законов управления и к изменению уровня сложности описания моделей ОУ.

Пример 2. Допустим, что логический ПИД-регулятор имеет закон управления вида

$$u(n) = \begin{cases} K \cdot e + u_0(n-1), & \text{если } d|e|/dt \geq 0, \\ u_0(n) = u_0(n-1) + kKe_m(n) = kK \sum_{i=1}^m e_i(m), & \text{если } d|e|/dt < 0, \end{cases} \quad (2.2)$$

где K — заданный коэффициент изменения, а k — варьируемый коэффициент усиления. В (2.2) логический выбор закона управления осуществляется в зависимости от знака скорости изменения ошибки управления.

Закон управления для интеллектуального ПИД-регулятора формируется по аналогии с примером 1 на координационном уровне и описывается продукционными правилами в ЭС вида [115]:

$$\text{если } d|e|/dt \geq 0, \text{ то } u(n) = Ke + u_I(n-1), \quad \Delta u_I(n) = \frac{1}{T_I} \int e(n)dt, \quad (2.3)$$

$$\text{если } d|e|/dt < 0 \text{ и } d|\dot{e}|/dt > 0, \text{ то } u(n) = T_d \cdot de/dt + u_I(n), \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \text{если } d|e|/dt < 0 \text{ и } d|\dot{e}|/dt \leq 0, \text{ то } u(n) = u_I(n) = \Delta u_I + \Delta u_I(n-1) = \\ = \sum_{j=1}^n \Delta u_{Ij} = \frac{1}{T_I} \sum_{j=1}^n \int e_j dt. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Выбор закона управления в данном случае осуществляется на основе дополнительного логического ограничения в виде проверки знака ускорения изменения ошибки управления. Соотношения (2.3)—(2.5) являются описанием П-, И-, Д-регуляторов и в логической сумме составляют многомодовый ПИД-регулятор [115].

На рис. 3 показаны результаты имитационного моделирования переходных процессов для заданного ОУ с использованием в контуре управления логического (2.2), интеллектуального (2.3)—(2.5) и традиционного ПИД-регулятора при единичном ступенчатом входном сигнале. При этом на рис. 3, а приняты следующие значения параметров: для логического ПИД-регулятора $K = 100$, $k = K^{-1} = 0.01$; для интеллектуального ПИД-регулятора соответственно $K = 750$, $T_d = 27$, $T_I = 0.05$, $T = 0$. На рис. 3, б для логического ПИД-регулятора принято $K = 6.4$, $k = 1/6.4$; для интеллектуального ПИД-регулятора $K = 11.4$, $T_d = 1.525$, $T_I = 0.15$, $T = 0$ соответственно. Из сравнения результатов моделирования видно, что качество переходных процессов ОУ при использовании интеллектуального ПИД-регулятора выше по сравнению с логическим ПИД-регулятором (см. рис. 3, а); интеллектуальный ПИД-регулятор обладает большей степенью грубости и адаптации при изменении передаточной функции ОУ по сравнению с традиционным и логическим ПИД-регулятором (рис. 3, б, в).

Таким образом, из примеров 1, 2 следует, что для повышения эффективности и расширения диапазона функционирования традиционных моделей регуляторов необходимо вводить двухуровневую схему проектирования: на верхнем (координационном) уровне формируется алгоритм управления, а на нижнем (исполнительном) уровне осуществляется реализация выбранного алгоритма управления. Следовательно, приходим к методологии проектирования регуляторов с различными уровнями интеллектуальности, представленной на рис. 1.

3. Нечеткие ЭС в интеллектуальных САУ. Дальнейшее снижение требований к точности описания динамического поведения ОУ за счет его лингвистической аппроксимации привело к новому принципу формирования баз знаний активных ЭС на основе методов теории нечетких множеств [79, 104, 116—121]. В результате разработано достаточно большое количество моделей нечетких ЭС второго поколения [113, 121, 122], широко используемых в различных проблемно-ориентированных областях: в робототехнике [5, 119, 123]; нечетких системах управления и нечетких контроллерах для атомных регуляторов [124]; человеко-машинных системах [125]; в иерархических нечетких системах супервизорного управления сложными динамическими объектами (например, вращающимися печами для обжига и сушки, холодильными промышленными установками [126] и мн. др. [5]); в системах управления вспомогательными аппаратами, частично замещающими органы при утраченных функциях целостного организма (типа искусственной вентиляции легких [127]); для регулирования среднего кровяного

давления в аппаратах искусственного кровообращения и искусственной почки при лечении раковых опухолей [128, 129]; для управления сердечным выбросом и средним артериальным давлением при проведении операций на сердечно-сосудистой системе [130] с добавлением наркотических средств и анестетиков для релаксации сердечных мышц [130—132].

Согласно отмеченному принципу FZUP-методологии проектирования, применение ЭС совместно с нечеткими нейронными сетями типа FNN в контуре управления относится к этапу обучения с целью пополнения и проверки на корректность базы знаний, а также формирования алгоритмов управления. Опыт применения ЭС в нечетких контроллерах и САУ выявил [133—147] дополнительные особенности формирования этапов проектирования интеллектуальных регуляторов и САУ на базе нечетких ЭС, нашедших частично свое отражение в моделях нечетких САПР [148—150]. Отметим одну из таких особенностей, имеющую важное методологическое значение для процессов проектирования нечетких регуляторов и САУ. Приведенные модели ОУ обладают переменной структурой, широким диапазоном изменения параметров структуры (нестационарные нелинейные системы), а многим из ОУ присуще функционирование в аварийных ситуациях (типа дезактивации рабочих помещений АЭС, тушения пожаров, виброзащита сооружений при интенсивных воздействиях) или развитие патофизиологических процессов (например, острая дыхательная недостаточность и т. п.). Таким образом, возникает необходимость в создании интеллектуальных САУ для управления ОУ в экстремальных ситуациях. Поэтому разработка нечетких контроллеров с активными ЭС включает в себя также вопрос надежности подобных интеллектуальных САУ при наличии отказов и сбоев в процессах управления, наличия ненадежных элементов в структуре ОУ и САУ [133]. Проектирование таких интеллектуальных САУ для ОУ с переменной структурой в экстремальных ситуациях осуществляется на основе разработанной методологии и принципов построения иерархических структур (FZUP-систем), интеллектуальных «в большом» [5, 39]. При этом в контур управления такими ОУ вводятся два нечетких контроллера, один из которых управляет ОУ, функционирующим в условиях вариаций параметров, не изменяющих структуру ОУ; второй нечеткий регулятор на активной ЭС с глубинным представлением знаний предназначен для управления ОУ в экстремальных ситуациях. Примеры таких моделей описаны в [127, 133]. При этом первый нечеткий контроллер относится к классу интеллектуальных «в малом», а второй нечеткий контроллер — к классу интеллектуальных «в большом». Особый интерес такой подход представляет для разработки мобильных систем с роботами вертикального перемещения, предназначенных для ликвидации аварийных ситуаций типа пожаротушения, очистки помещений после взрывов и т. п. [152]. Пример разработки нечеткой ЭС для оценки размера и динамики развития пожара можно найти в [153].

Здесь в качестве примера рассмотрим особенности применения базы знаний ЭС для улучшения динамических характеристик традиционных моделей регуляторов, в т. ч. интеллектуальных «в малом».

Пример 3. В существующих технологиях разработки нечетких логических контроллеров [154—162] основное внимание уделяется определению качественных характеристик динамического поведения ОУ при использовании базы знаний в виде продукционных правил в сравнении с традиционным ПИД-регулятором. Для этого случая выявлены существенные преимущества использования нечетких регуляторов, когда модель ОУ существенно нелинейна, описание связей имеет высокую степень неопределенности (слабо структурированные модели) и может быть сведена к ограниченному количеству продукционных правил и др. [5]. Представляет интерес при разработке процессов проектирования сравнение качественных характеристик ОУ для трех случаев, когда в контуре управления используется интеллектуальный регулятор, нечеткий регулятор или оптимальный ПИД-регулятор. Допустим, что ОУ описывается передаточной функцией

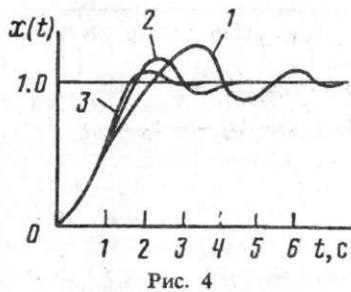


Рис. 4

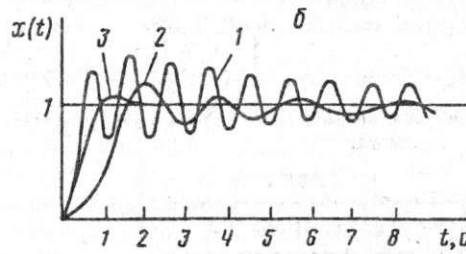
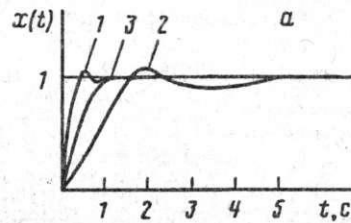


Рис. 5

Рис. 4. Результаты имитационного моделирования колебательной системы с различными регуляторами: 1 — ПИД-регулятор; 2 — оптимальный ПИД-регулятор; 3 — интеллектуальный ПИД-регулятор

Рис. 5. Результаты имитационного моделирования линейной системы с запаздыванием при различных видах используемых регуляторов: 1 — ПИД-регулятор; 2 — нечеткий ПИД-регулятор; 3 — интеллектуальный ПИД-регулятор; а — $\tau = 0.5$ с, б — $\tau = 1.0$ с

$\Phi(s) = 1/(1 + T_1s)(1 + T_2s)$. Рассмотрим три случая, когда используется традиционный ПИД-регулятор, с критерием качества $\min \int_0^t |e(t)| dt$ и ПИД-регулятор с ЭС. На рис. 4 представлены результаты моделирования [138], показывающие эффективность применения интеллектуального ПИД-регулятора.

Пример 4. Рассмотрим теперь линейный ОУ с запаздыванием вида $\Phi(s) = \exp(-\tau s)/(1 + 5s)$. Так же как и в примере 3, задаются три случая, когда в контуре управления применяются ПИД-регулятор, нечеткий ПИД-регулятор и интеллектуальный регулятор из примера 1. На рис. 5 приведены результаты моделирования [139] динамического поведения ОУ на ступенчатое воздействие при различных величинах времени запаздывания. Из рис. 5, а, б видно, что с увеличением времени запаздывания эффективность интеллектуального регулятора возрастает по сравнению с нечетким и традиционным ПИД-регулятором. Дополнительные примеры моделирования можно найти в [135].

В целом приведенные в примерах 1—4 результаты моделирования показывают, что интеллектуальные регуляторы обладают развитыми функциональными возможностями, большей степенью адаптации и робастности [5, 99, 100]. Рассмотренная методика является составной частью САПР нечетких интеллектуальных регуляторов и САУ.

4. Методологические особенности разработки моделей логических регуляторов, интеллектуальных «в малом» (нечеткие регуляторы). Остановимся на некоторых качественных особенностях методологии проектирования нечетких регуляторов, используя результаты конкретных примеров. Строгие математические конструкции и методы исследования нечетких регуляторов приведены в последующих частях данного цикла работ.

Возможность использования лингвистической аппроксимации ОУ в алгоритмах управления имеет существенное преимущество перед традиционными регуляторами, когда сама модель ОУ либо существенно нелинейна, либо ОУ функционирует в хаотически построенной внешней среде. Условия существования нелинейностей

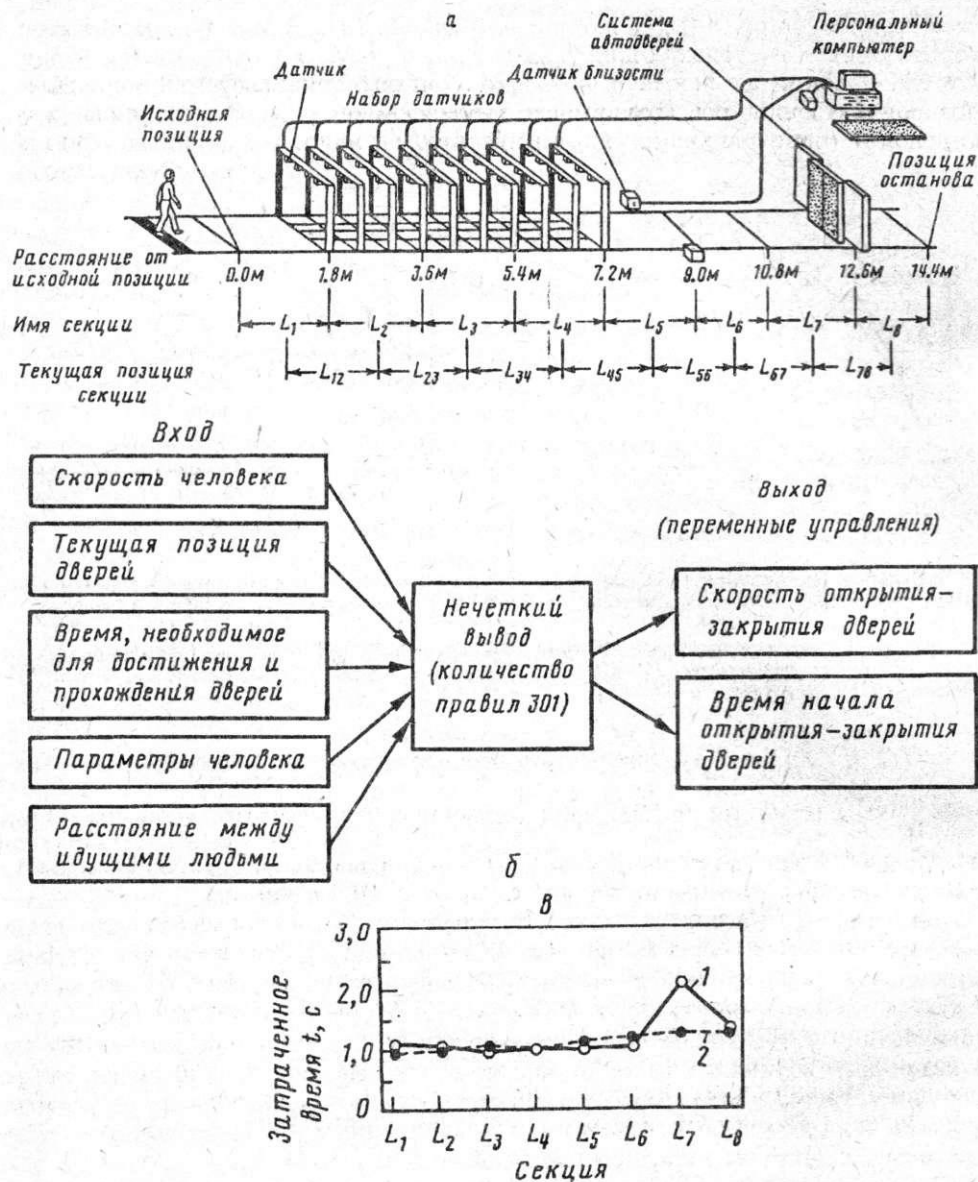


Рис. 6. Нечеткая система управления автоматическим закрыванием и открыванием дверей: а — общая схема системы; б — структура блока нечеткого логического вывода; в — экспериментальные данные результатов измерения затраченного времени на прохождение пешеходом каждой из секций L_i ($i = 1, 2, \dots, 8$): 1 — традиционный способ управления автоматическими дверьми; 2 — управление на базе нечеткой логики

в ОУ и преодоление сложностей исследования с помощью нечетких моделей регуляторов показано во многих работах [163]. Приведем простой иллюстративный пример, когда эффективно применяется нечеткий регулятор (по сравнению с традиционным ПИД-регулятором) в случае хаотически организованной внешней среды.

Пример 5. Рассмотрим модель нечеткого регулятора для автоматической двери аэропорта (рис. 6, а), представленную в докладе «Basic Study of an Automatic Door System Using Fuzzy Inference» на китайско-японском симпозиуме по нечетким множествам и системам (15—18 октября 1990 г.) [164]. Процесс

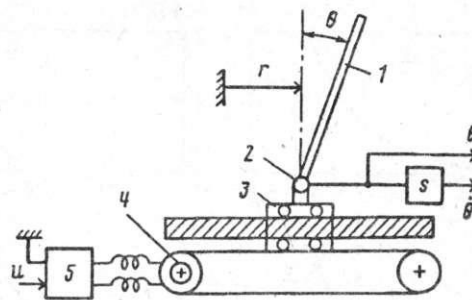
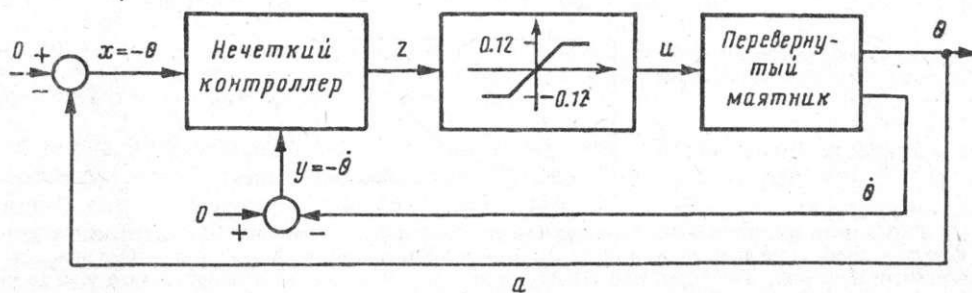
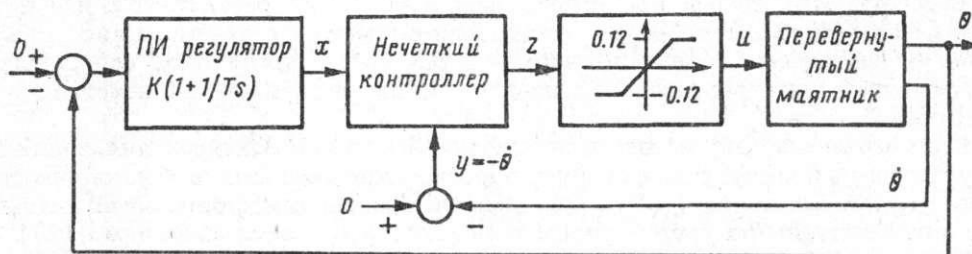


Рис. 7. Экспериментальная схема проверки устойчивости перевернутого маятника: 1 — маятник, 2 — потенциометр, 3 — движущаяся тележка, 4 — двигатель, 5 — усилитель мощности



а



б

Рис. 8. Структурные схемы управления устойчивым положением перевернутого маятника: а — схема с нечетким контроллером; б — комбинированная схема управления (ПИ-регулятор и нечеткий контроллер)

открытия — закрытия дверей (как ОУ) осуществляется в хаотически организованной внешней среде в виде неравномерного движущегося потока (приближения — удаления) посетителей. При прохождении потока посетителей через девять секций с сенсорными датчиками осуществляются измерения следующих параметров: скорость движения отдельного человека в потоке; текущая позиция двери; время, необходимое для достижения и прохождения дверей; антропометрические данные человека (рост, вес и т. п.); текущее расстояние между движущимися посетителями. Время выборки составляет 50 мкс. Данные параметры являются входными сигналами для блока логического нечеткого вывода (см. рис. 6, б), содержащего в базе знаний 301 продукционное правило. Выходными параметрами данного блока являются переменные управления скоростью и временем начала процесса открытия — закрытия дверей. Критерием качества работы САУ является время ожидания посетителем открытия дверей. На рис. 6, в представлены результаты экспериментальной проверки работы нечеткого регулятора в сравнении с традиционным методом сенсорного управления. Следует отметить высокую эффективность работы нечеткого контроллера в экстремальных ситуациях, когда посетитель пересекал секции быстрым шагом или бегом и

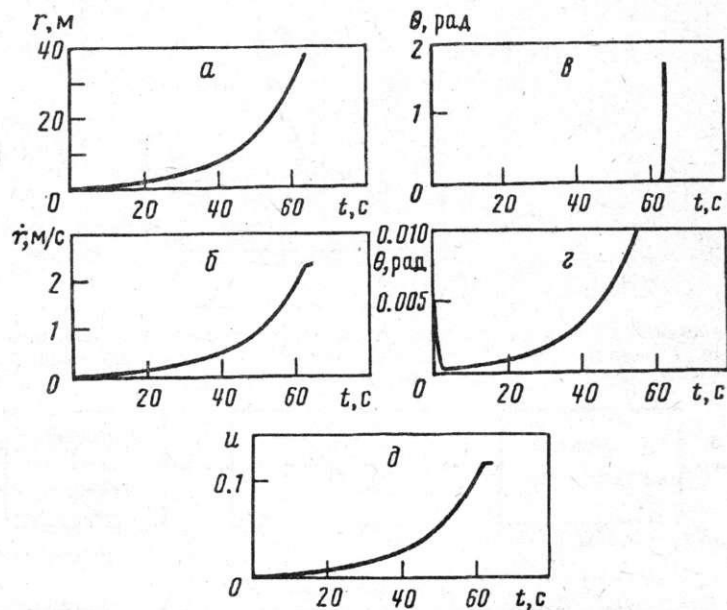


Рис. 9. Результаты имитационного моделирования устойчивости перевернутого маятника на схеме рис. 8, а: а — положение движущейся тележки; б — скорость движения тележки; в — угол положения перевернутого маятника; г — увеличенное изображение рис. 9, в; д — изменение сигнала управления

система управления успешно выполняла свои функции. Время ожидания посетителем открытия дверей при использовании нечеткого регулятора снижено в среднем на 87%. Таким образом, традиционному методу стохастического управления в хаотически организованной внешней среде может быть сопоставлен эффективный (альтернативный) подход на основе использования нечетких регуляторов.

Рассмотрим еще одну методологическую особенность проектирования нечетких регуляторов на примере решения широко распространенной задачи об устойчивости перевернутого маятника [165—172], представляющей самостоятельный интерес для интеллектуальных систем управления работой человека-оператора [173].

Пример 6. Модель перевернутого маятника представлена на рис. 7. Требуется с помощью управляющей силы, перемещающей тележку в горизонтальной плоскости, удержать неустойчивый маятник в устойчивом положении. Из практики хорошо известно, что с помощью манипуляций руки легко удержать на ладони перевернутый маятник в устойчивом положении. Этот факт привел к идее применить для решения такой задачи нечеткий регулятор на основе использования всего семи продукционных правил [165]. Аналогичный подход использовался и при решении задачи об устойчивости перевернутого двойного маятника [172]. Уравнение движения перевернутого маятника под действием управляющей силы u хорошо известно из аналитической механики и имеет вид

$$(M + m)\ddot{r} + ml \cos \theta \ddot{\theta} = -D\dot{r} + ml\dot{\theta}^2 \sin \theta - Gu, \quad (4.1)$$

$$ml \cos \theta \ddot{r} + (\sigma + ml^2)\ddot{\theta} = -c\dot{\theta} + mlg \sin \theta,$$

где принято $M = 0.393$ кг, $m = 0.074$ кг, $D = 2.847$ кг/с, $G = 56.29$ Н/В, $g = 9.8$ м/с², $l = 0.358$ м, $\sigma = 0.0095$ кгм², $c = 0.00218$ кгм²/с.

В модели (4.1) в отличие от известных подходов примем ограничение на амплитуду допустимой управляющей силы u в виде $|u| \leq 0.12$ В.

На рис. 8, а представлена структурная схема системы управления устойчивым положением перевернутого маятника с использованием нечеткого регулятора и введенным ограничением на управление.

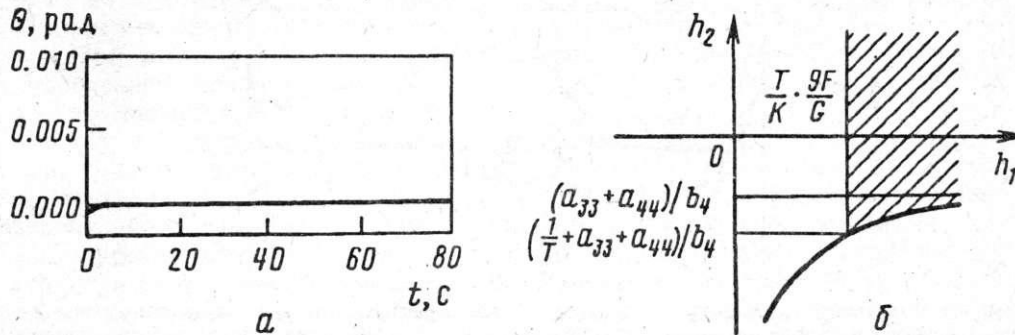


Рис. 10. Результаты имитационного моделирования устойчивости перевернутого маятника по схеме рис. 8, б: а — угол положения перевернутого маятника, б — области устойчивости в пространстве параметров нечеткого регулятора и ПИ-регулятора

На рис. 9 приведены результаты моделирования [170] динамического поведения перевернутого маятника при начальном условии $\theta(0) = 0.01$ рад. Из рис. 9, а, г видно, что с течением времени угол отклонения от положения равновесия увеличивается и маятник теряет свое устойчивое состояние. На рис. 8, б представлена структурная схема комбинированной системы управления, использующей ПИ-регулятор совместно с нечетким регулятором. Результаты моделирования динамического поведения перевернутого маятника со схемой управления рис. 8, б представлены на рис. 10, а. Из рис. 10, а видно, что введение в структуру нечеткой системы управления ПИ-регулятора дает возможность устойчиво удерживать перевернутый маятник относительно неустойчивого положения равновесия. При этом параметры ПИ-регулятора имели вид [170] $K = 5$, $T = 2.5$. Анализ условий устойчивости движения перевернутого маятника можно получить из линеаризованной системы (4.1) вида $(v = [r, \theta, \dot{r}, \dot{\theta}]^T) \dot{v} = Av + bu$, где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} a_{32} &= -m^2 l^2 g \cdot \beta^{-1}; & a_{33} &= -D(\sigma + m l^2) \beta^{-1}; \\ a_{34} &= c m l \beta^{-1}; & a_{42} &= (M + m) m l g \beta^{-1}; \\ a_{43} &= D m l \beta^{-1}; & a_{44} &= -(M + m) c \beta^{-1}; \\ b_4 &= m l G \beta^{-1}; & b_3 &= -(\sigma + m l^2) G \beta^{-1}; \\ \beta &= \sigma(M + m) + M m l^2. \end{aligned}$$

Задача оценки устойчивости линеаризованной системы с нечетким регулятором (описываемым линейным коэффициентом усиления в цепи обратной связи $H = [0h_1, 0h_2]$) сводится к исследованию полинома вида

$$s[s^3 + (Q_{11} + Q_{12}h_2)s^2 + (Q_{21} + Q_{22}h_1)s + Q_{31}] = 0, \quad (4.2)$$

где $Q_{11} = -a_{33} - a_{44}$; $Q_{12} = b_4$; $Q_{21} = a_{33}a_{44} - a_{42} - a_{34}a_{43}$; $Q_{22} = b_4$; $Q_{31} = -a_{43}a_{32} + a_{33}a_{42}$. Из (4.2) следует, что необходимым условием устойчивости является наличие отрицательного значения свободного члена Q_{31} вида

$$Q_{31} = \frac{Dm^3 l^2 g - D(\sigma + m l^2)(M + m) m l g}{\beta^2} < 0, \quad D \neq 0,$$

что означает наличие узких границ области устойчивости нечеткого регулятора в данной ситуации. Для схемы рис. 8, б аналогичный полином имеет вид [170]

$$s^2 \left[s^3 + (Q_{11} + Q_{12}h_2)s^2 + (Q_{21} + k b_4 h_1)s + Q_{31} + \frac{K b_4 h_1}{T} \right] = 0, \quad (4.3)$$

в который помимо параметров нечеткого регулятора входят параметры ПИ-регулятора. Такая схема обладает более широкими границами устойчивости по

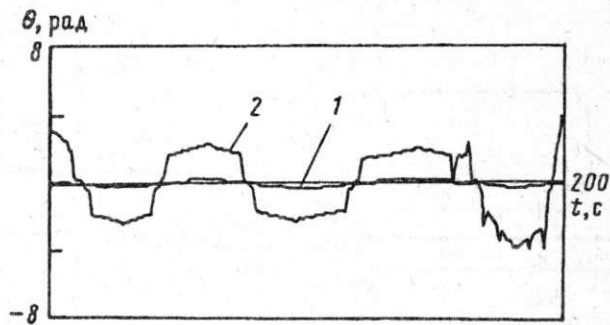


Рис. 11. Результаты моделирования устойчивости перевернутого маятника при использовании адаптивного нечеткого регулятора в контуре управления: 1 — выходной сигнал (угол отклонения маятника); 2 — выходной сигнал управления нечеткого адаптивного контроллера

сравнению со схемой рис. 8, а. На рис. 10, б показаны границы устойчивости комбинированной системы в области параметров (h_2, h_1) для полинома (4.3).

Идея комбинированного применения ПИ-, П-регуляторов использовалась также в [171] в зависимости от вида формируемой обратной связи. Так, для отрицательной обратной связи рекомендуется использовать ПИ-регулятор, а для положительной обратной связи используется П-регулятор.

Аналогичный результат о комбинированном использовании нечеткого регулятора и линейной обратной связи получен в [174] при исследовании устойчивости перевернутого маятника, который переводится в вертикальное состояние из устойчивого положения при ограничении на допустимый ход тележки. При этом перевод из устойчивого положения в вертикальное неустойчивое положение осуществляется нечетким регулятором (как интеллектуальным средством преодоления существенно нелинейных неголомомных связей), а удержание в устойчивом вертикальном положении маятника осуществляется организацией линейной обратной связи на традиционных моделях регулятора.

Более широкое исследование [175, 176] показало плодотворность гибридного подхода использования нечеткого регулятора совместно с ПИД-регулятором. С другой стороны, устойчивое состояние перевернутого маятника можно получить без применения ПИ-регулятора за счет усложнения алгоритма управления нечеткого регулятора с применением адаптации [157] или обучения на нейронной сети [169, 172]. На рис. 11 показаны результаты имитационного моделирования устойчивости перевернутого маятника с адаптивным нечетким регулятором. Приведенный на рис. 11 пример свидетельствует о возможности решения задачи об устойчивости перевернутого маятника за счет применения только интеллектуальных средств в виде продукционных правил логического нечеткого вывода.

В общем случае, согласно [177], необходимо также вводить два уровня — координационный (верхний уровень) как интеллектуальный уровень и нижний уровень (нечеткий регулятор или ПИД-регулятор) как исполнительный уровень. Таким образом, и в этом случае приходим к методологии проектирования, представленной на рис. 1.

Заключение. Рассмотренная методология проектирования нечетких моделей интеллектуальных регуляторов и систем управления позволяет сделать следующие выводы.

Применение нечетких моделей регуляторов и, в особенности, систем управления «интеллектуальных в большом» позволяет существенным образом улучшить динамические характеристики ОУ, функционирующих в условиях неопределенности входной информации или в хаотически организованной внешней среде. Проектирование управляющих систем такого класса представляет собой сложную проблему, поскольку получение требуемых динамических характеристик достижимо различными путями: либо за счет усложнения модели исполнительного

уровня, либо за счет привлечения интеллектуальных средств с более широкими возможностями. Предлагаемая в статье методология дает возможность установить желаемое соответствие между исполнительным и интеллектуальными уровнями по результатам имитационного моделирования в зависимости от проблемной ориентации решаемой задачи, целей управления и условий функционирования ОУ.

Основу методологии проектирования управляющих систем с различной степенью (уровнями) интеллектуальности составляют методы имитационного моделирования, обучения и адаптации с использованием нейронных сетей, позволяющие сформировать специальную базу знаний принятого интеллектуального уровня. Это дает возможность сформулировать основные требования к структуре соответствующей САПР, базу которой составляют такие блоки, как блок имитационного моделирования, нечеткая нейронная сеть с обучением и адаптацией, блок механизмов приближенных рассуждений (включающий нечеткий вывод), формирователь базы знаний, формирователь и интерпретатор нечетких операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красовский А. А. Неклассическая оптимизация и адаптивное оптимальное управление // Изв. АН. Техн. кибернетика. 1992. № 6.
2. Первозванский А. А. Чувствительность, грубость и эффективность адаптации // Изв. АН. Техн. кибернетика. 1992. № 6.
3. Петров Б. Н., Уланов Г. М., Ульянов С. В. Теория моделей в процессах управления: Термодинамические и информационные аспекты. М.: Наука, 1978.
4. Петров Б. Н., Уланов Г. М., Ульянов С. В. и др. Информационно-семантические проблемы в процессах управления и организации. М.: Наука, 1977.
5. Захаров В. Н., Ульянов С. В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. Ч. I, II // Изв. АН. Техн. кибернетика. 1992. № 5; 1993. № 4.
6. Ульянов С. В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных систем управления: теоретические и прикладные аспекты // Изв. АН. Техн. кибернетика. 1991. № 3.
7. Mamdani E. H. Application of fuzzy set theory to control systems: A survey // Fuzzy Information and Decision Proc. / M. M. Gupta and E. Sanchez (Ed.), North-Holland Publ. Comp., 1982.
8. King P. J., Mamdani E. H. The application of fuzzy control systems to industrial processes // *ibid.*
9. Mamdani E. H., Sembi B. S. Process control using fuzzy logic // Fuzzy sets: Theory and Applications to Policy Analysis and Information Systems / Wang P. P. and Chang S. K. (Eds). Plenum Press, N. Y., 1980.
10. Larsen P. M. Industrial applications of fuzzy logic control // Int. J. Man-Machine Stud. 1980. V. 12. № 1.
11. Umbers I. G., King P. J. An analysis of human decision-making in cement kiln control and the implication for automation // Int. J. Man-Machine Stud. 1980. V. 12. № 1.
12. Mamdani E. H., Østergaard J. T., Lembessis E. Use of fuzzy logic for implementing rule-based control of industrial processes // Fuzzy Inf. and Decision Proc. North-Holland Publ. Comp., 1984.
13. Haruki K., Higashi T. Recent trends in fuzzy control engineering // Toshiba Rev. 1988. V. 43. № 4.
14. Sugeno M., Kang G. T. Fuzzy modelling and control of multilayer incinerator // Fuzzy Sets and Systems. 1986. V. 18. № 3; 1988. V. 25. № 2.
15. Ono H., Ohnishi T., Terada V. Combustion control of refuse incineration plant by fuzzy logic // Fuzzy Sets and Systems. 1989. V. 32. № 2.

16. *Nojima M., Maebo K., Yoshii S. et al.* Burn-out point detector and control system using image-processing technique and approximate reasoning for municipal refuse incinerator // *Ishikawajima-Harima Eng. Rev.* 1989. V. 29. № 6.
17. *Motoki T.* Fuzzy control systems // *Nat. Cont. Publ. Inst. Eng. Austral.* 1990. № 6.
18. *Mukaidono M.* Recent topics of fuzzy control from a viewpoint of application // *OHM.* 1991. V. 78. № 10.
19. Fuzzy control and introduction to home appliances // *Techno Jap.* 1991. V. 24. № 9.
20. *Takata K.* Research refines fuzzy logic technology, clarifies artificial intelligence use // *J. Electron. Eng.* 1991. V. 28. № 12.
21. *Suzuki K.* New control method utilized fuzzy logic // *Ebara Eng. Rev.* 1992. V. 4. № 155.
22. *Hattori S., Nahajima M., Katayama Y.* Fuzzy control algorithm and neural network for flatness control of a cold rolling processes // *Hitachi Rev.* 1992. V. 41. № 1.
23. *Weinmann A.* Die Vorteile von fuzzy Control für den industriellen Anwender // *Elin-Zeitschrift.* 1992. V. 44. № 3/4.
24. *Khurana H.* Fuzzy logic control — A tutorial // *Tete Techn. Rev.* 1991. V. 8. № 5.
25. Automatisierungstechnik: Immer mehr Hersteller setzen auf Fuzzy-Logic // *Konstruktionspraxis.* 1992. № 12.
26. Fuzzy logic solves tough control problems // *Cognizer Rep.* 1992. V. 4. № 10.
27. Tools abound for incorporating fuzzy logic into today's designs // *Cognizer Rep.* 1992. V. 4. № 10.
28. Fuzzy take on traditional logical controllers // *Cognizer Rep.* 1992. V. 4. № 10.
29. Hybrid fuzzy-neural systems coming trend // *Cognizer Rep.* 1992. V. 4. № 5.
30. *Terano T., Asai K., Sugeno M.* Applied fuzzy systems. OHM Comp. Tokyo, 1989.
31. *Graham I.* Fuzzy logic in commercial expert systems — Results and prospects // *Fuzzy Sets and Systems.* 1991. V. 40. № 3.
32. *Turksen I. B.* Fuzzy expert systems for IE/OR/HS // *Fuzzy Sets and Systems.* 1992. V. 51. № 1.
33. *Acar L., Özgüner Ü.* Design of knowledge-rich hierarchical controllers for large functional systems // *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics.* 1990. V. 20. № 4.
34. *Shin K. G., Gui X.* Design of a knowledge-based controller for intelligent control systems // *Ibid.* 1991. V. 21. № 2.
35. *Nakamura Y.* An architecture of intelligent controller for multi-sensor robotic system // *Rob: Com Age: Proc. Int. Symp. Sydney, 1988.*
36. *Leitch R., Gallanti M.* Task classification for knowledge-based systems in industrial automation // *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics.* 1992. V. 22. № 1.
37. *Freedman R. S., Stuzin G. T.* A knowledge-based methodology for tuning analytical models // *ibid.* 1991. V. 21. № 2.
38. *Ульянов С. В.* Нечеткие модели логических регуляторов в интеллектуальных системах управления мобильными робототехническими комплексами // *Обработка динамической информации в интеллектуальных системах.* М.: ИФТП РАН, 1992.
39. *Uljanov S. V., Zakharov V. N.* Towards design of AI control systems // *Preprints of EWAIC'93. Moscow, 1993.*
40. *Fukuda T., Shibata T.* Theory and applications of neural networks for industrial control systems // *IEEE Trans. Industr. Electr.* 1992. V. 39. № 6.
41. *Berenji H. R.* Learning and tuning fuzzy logic controllers through reinforcements // *IEEE Trans. on Neural Networks.* 1992. V. 3. № 5.

42. Dote Y. Fuzzy and neural network controller // IECON'90: 16th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (Calif. Nov. 27-30, 1990). N. Y., 1990. V. 2.
43. Werbos J. Neurocontrol and fuzzy logic: connections and designs // IJCNN-91: Int. Conf. Neur. Networks. (Wash. July 8-12, 1991). N. Y., 1991.
44. Yamaguchi T., Takagi T., Mita T. Self-organizing control using fuzzy neural networks // Int. J. Control. 1992. V. 56. № 2.
45. Van der Rhee F., Van Nauta Lemke H. R., Dijkman J. G. Knowledge based fuzzy control of systems // IEEE Trans. Automatic Control. 1990. V. 35. № 2.
46. Sugeno M., Kang G. T. Structure identification of fuzzy model // Fuzzy Sets and Systems. 1988. V. 28. № 1.
47. Sugeno M., Tanaka K. Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system // Fuzzy Sets and Systems. 1991. V. 42. № 3.
48. Celmins A. A practical approach to nonlinear fuzzy regression // SIAMJ. Sci. Stat. Comput. 1991. V. 12. № 3.
49. Kosko B. Neural networks and fuzzy systems: A dynamical system approach to machine intelligence. Prentice Hall, 1992.
50. Takagi H., Suzuki N., Koda T., Kojima Y. Neural networks designed on approximate reasoning architecture and their applications // IEEE Trans. Neural Networks. 1992. V. 3. № 5.
51. Pacini P. J., Kosko B. Adaptive fuzzy systems for target tracking // Intell. Syst. Eng. 1992. V. 1. № 1.
52. Hayashi Y., Nakai M. Automated extraction of fuzzy IF-THEN rules using neural networks // Trans. Inst. Elect. Eng. Jap. C. 1990. V. 110. № 3.
53. Horikawa S.-I., Furuhashi T., Uchikawa Y. On fuzzy modelling using fuzzy neural networks with back-propagation algorithm // IEEE Trans Neural Networks. 1992. V. 3. № 4.
54. Wang L.-X., Mendel J. M. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning // IEEE Trans. Neural Networks. 1992. V. 3. № 4.
55. Jamafuji K., Fujimoto H., Ulianov S. et al. Fuzzy correction motion control of the mobile robot for service use // Proc. 6th Int. Conf. Adv. Rob. (ICAR'93) (Nov. 1-2, 1993, Tokyo). Tokyo, 1993.
56. Окума С., Фурухаси Т. Управление с использованием нейронных и нечетких систем // Кикай Сэжкэй. 1991. Т. 35. № 8.
57. Kong S.-G., Kosko B. Comparison of fuzzy and neural truck backer-upper control systems // IJCNN Int. Conf. Neural Networks (San Diego, Calif., 1990). N. Y., 1990. V. 3.
58. Lin Ch.-T., Lee C. S. Neural-network-based fuzzy logic control and decision system // IEEE Trans. on Comp. 1991. V. 40. № 12.
59. Кузьмин В. Б., Травкин С. И. Теория нечетких множеств в задачах управления и принципах устройства нечетких процессоров: Обзор зарубежной литературы // А и Т. 1992. № 11.
60. Mills W. J., Daffinger C. A. An analog VLSI array processor for classical and connectionist AI // Proc. Int. Conf. Appl. Specific Array Processors (N. Y., Sept. 5-7, 1990). Los Alamitos (Calif.) etc., 1990.
61. Inoue T., Motomura T., Matsuo R., Veno F. New OTA-based analog circuits for fuzzy membership functions and max/min operations // IEICE Trans. 1991. V. 74. № 11.
62. Догу М. Обзор аппаратных средств на нечеткой логике // Дэнси Гидзюцу. 1991. Т. 33. № 1.
63. Как изменились аппаратные устройства систем управления с применением нечеткой логики? // Дэнси Гидзюцу. 1991. Т. 33. № 1.
64. Такада К. Встраиваемый нечеткий контроллер // Там же.
65. Нумта К. Нечеткий контроллер и примеры его применения // Отомэсэн. 1991. Т. 36. № 13.

66. Иокидэ Т., Какидзаки М., Оно Н. Блок ускоренного нечеткого логического вывода для процессов управления // Мэйдэн Дзихо. 1992. № 225.
67. *Chineh T.-C.* Optimization of fuzzy inference architecture // *Computer*. 1992. V. 25. № 5.
68. *Pang F.* The principle of real-time fuzzy reasoning engine by asynchronous modulation // *Acta Electron. Sin.* 1992. V. 20. № 8.
69. *Koszy L. T., Hirota K., Ozawa K.* Knowledge representation and accumulation by fuzzy flip-flops // *Fuzzy Sets and Systems*. 1991. V. 39. № 2.
70. Михалевич В. С., Самойленко Ю. И., Хорозов О. А. Принципы организации вычислительного процесса на атомно-молекулярном уровне // Кибернетика и системный анализ. 1992. № 2.
71. *Morisue M., Suzuki K.* A proposal of Josephson ternary fuzzy processor // ISEC'89: *Int. Superconduct. Electron. Cont.* (June 12—13, Tokyo, 1989). Tokyo, 1989.
72. *Yamaguchi T., Tanabe M., Takagi T.* Fuzzy associative memory applications to control // *Artif. Neural Networks: Proc. Int. Conf.* (Espoo, 24—28 June, 1991). Amsterdam etc., 1991. V. 2.
73. Син С. Нейро- и нечеткая технологии для процессов управления // Эрукутороникусу. 1992. Т. 37. № 4.
74. Система аппаратного обеспечения процессов проектирования на основе нейро- и нечеткой технологий // Санье Дэнки Гихо. 1992. Т. 24. № 2.
75. Применение нейро- и нечеткой технологий в системах управления // Санье Дэнки Гихо. 1992. Т. 24. № 2.
76. Захаров В. Н., Хорошевский В. Ф. Искусственный интеллект: Программные и аппаратные средства. М.: Радио и Связь, 1990. Кн. 3.
77. *Yamazaki T.* A survey on general purpose fuzzy control systems // *J. Soc. Instrum. Contr. Eng.* 1989. V. 28. № 11.
78. *Saridis G. N., Valavanis K. P.* Analytical design of intelligent machine // *Automatica*. 1988. V. 24. № 2.
79. Захаров В. Н., Ульянов С. В. Принципы построения моделей интеллектуальных машин и когнитивных систем управления // Интеллектуальные системы обработки динамической информации. М.: ИФТП, 1993.
80. *Astrom K. J., Anton J. J., Arzen K. E.* Expert control // *Automatica*. 1986. V. 22. № 3.
81. *Myron T. J.* Self-tuning PID control — An expert system approach // *Automatic Control in Petroleum, Petrochemical and Desalination Ind.* / *Proc. of the IFAC Workshop*, Kuwait, 1986.
82. *Carmon A.* Intelligent knowledge-based system for adaptive PID controller tuning // *J. A.* 1986. V. 27. № 3.
83. *Porter B., Jones A. H., McKeon C. B.* Real-time expert tuner for PI controller / *IEE Proc. D.* 1987. V. 134. № 2.
84. *Arzen K.-E.* Knowledge-based control systems // *Proc. Amer. Contr. Conf.* (San Diego, Calif., May 23—25, 1990). Green Valley (Ariz.). 1990. V. 2.
85. *Torteh-Isfahani M., Akimoto Y., Tanaka H., Ogi H.* Intelligent controller design and application // *IECON'89: 15th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.* (Philadelphia, Pa, Nov. 6—10, 1989). N. Y., 1989. V. 1.
86. *Litt J.* An expert system to perform on-line controller tuning // *Proc. Amer. Contr. Conf.* (San Diego, Calif., May 23—25, 1990). Green Valley (Ariz.), 1990. V. 2.
87. *Looney C. G.* Rule acquiring expert controllers / *IEEE Trans. on Knowledge and Data Eng.* 1991. V. 3. № 2.
88. *Filip F. G., Roberts P. D., Zhang J.* Combined numeric / knowledge based hierarchical control I, II // *Stud. Inf. and Contr.* 1992. V. 1. № 2; № 3.
89. *Tzafestas S. G.* Artificial intelligence and expert system techniques in control: An overview // *Syst. Anal. Model. Simul.* 1990. V. 7. № 3.

90. Jiang C., Hu Z. The intelligence control of flight control system by the simulating human behaviour // J. Nanjing Aeronaut. Inst. 1990. V. 22. № 3.
91. Tian H., Jiang W. An expert controller: Design principles and comparative study // Inf. and Contr. 1990. V. 19. № 13; Real time expert self-learning algorithm for regulator gains (large) // Acta Autom. Sin. 1992. V. 18. № 1.
92. Xu H. Y., Baird C. R., Riordan D. An intelligent tuning control technique // Appl. Artif. Intell. 1990. V. 4. № 2.
93. Mahmoud M. S., Abou-Elseoud A. A., Kotob S. Development of expert control systems: A pattern classification and recognition approach // J. Intell. and Rob. Syst. 1992. V. 5. № 2.
94. Xu M. P. The intelligent PID controller for electronic engine // Proc. Autom. Instrum. 1991. V. 12. № 9.
95. Betta A., Linkens D. A. Intelligent knowledge-based system for dynamic system identification // Proc. IEEED. 1990. V. 137. № 1.
96. Halst M., Bastin G., Gevers M. et al. ESPION: An expert system for system identification // Automatica. 1990. V. 26. № 1.
97. Cai Z., Zhang T.-T. Theory and practice on intelligent control // J. Cent.-S. Inst. Min. and Met. 1989. V. 20. № 6; Intelligent control and intelligent control systems // Inf. and Control. 1989. V. 18. № 5.
98. Li Z. A study of intelligent control theory // Inf. and Control. 1991. V. 20. № 5.
99. Zhou Q. The robustness of an intelligent controller and its performance // Int. Conf. Contr. / IEEE Conf. Publ., 1985.
100. Zhang Z., Yang H. Robustness of a class of expert control systems // Inf. and Control. 1992. V. 21. № 2.
101. Tian H., Jiang W. Several recent developments of intelligent control systems // Inf. and Control. 1992. V. 21. № 2.
102. Gertler J., Chang H. An instability indicator for expert control // IEEE Contr. Syst. Mag. 1986. V. 3. № 1.
103. Yang S., Leu M. C. Stability and performance of a control system with an intelligent limiter // Proc. Amer. Contr. Conf. (Pittsburgh, Pa, June 21-23, 1989). Green Valley (Ariz.), 1989. V. 2.
104. Efstathiou J. Expert systems in process control. Longman, 1989.
105. Gupta M. M. Cognition, perception and uncertainty // BUSEFAL. 1989. V. 36. № 1.
106. Gupta M. M., Pedrycz W. Cognitive and fuzzy logic controllers: A retrospective and perspective // Proc. Amer. Contr. Conf. (Pittsburgh, Pa, June 21-23, 1989). Green Valley, 1989. V. 3.
107. Gupta M. M., Pedrycz W., Kiszka J. B. Fuzzy control: From fuzzy controllers to cognitive controllers // Proc. III Congress on Fuzzy System. Washington, 1989.
108. Gupta M. M. Design of cognitive feedback controller // Proc. 27-th IEEE Conf. Decis. Contr. (Austin, Tex., Dec. 7-8, 1988). N. Y., 1988. V. 1.
109. Gupta M. M., Pedrycz W. Fuzzy modelling and fuzzy logic controllers: A retrospective and perspective // BUSEFAL. 1984. V. 36. № 1.
110. Diamond J., McLeod R. D., Pedrycz W. A fuzzy cognitive structure: Foundations, applications and VLSI implementation // Fuzzy Sets and Systems. 1992. V. 47. № 1.
111. An L., Xueyan J., Quisi X. An intelligent control system for industrial furnace // IECON'90: 16th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (Calif., Nove. 27-30, 1990). N. Y., 1990. V. 1.
112. Porter B. Issues in the design of intelligent control systems // Proc. 12th IMACS World Congr. Sci. Comput. (Paris, July 18-22, 1988). Villeneuve d'Asq., 1988. V. 1.
113. Лупина Н. В., Слепченко А. Н., Ульянов С. В. и др. Гибридная экспертная система с глубинным представлением знаний для проектирования и диагностики биотехнических изделий // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1991. № 5.

114. Уланов Г. М., Ульянов С. В. Динамические системы с нечеткой и случайно изменяющейся структурами // Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибернетика. М.: ВИНТИ АН СССР, 1979. Т. 11; 1982. Т. 15.
115. Bai J.-G., Lu B.-C. A multi-mode PID controller // Chin. J. Sci. Instrum. 1993. V. 14. № 1.
116. Zadeh L. A. Knowledge representation in fuzzy logic // IEEE Trans. on Knowledge and Data Eng. 1989. V. 1. № 1.
117. Yager R. R. On the knowledge structure of multi-solution variables, including quantified statements // Int. J. Approximate Reason. 1987. V. 1. № 1.
118. Chen S.-M., Ke J.-S., Chang J.-F. Knowledge representation using fuzzy Petri nets // IEEE Trans. on Knowledge and Data Eng. 1990. V. 2. № 3.
119. Dodds D. R. Fuzziness in knowledge-based robotics systems // Fuzzy Sets and Systems. 1988. V. 26. № 2.
120. Xiong S. Man fuzzy system and its interaction with external world // Inf. and Contr. 1991. V. 5. № 3.
121. Kohout L. J., Anderson J., Baudler W. et al. Activity structure based architecture for knowledge-based systems: Dynamics of localized fuzzy inference and its interaction with planning // Fuzzy Sets and Systems. 1991. V. 44. № 3.
122. Buckley J. J., Tucker D. Second generation fuzzy expert system // Fuzzy Sets and Systems. 1989. V. 31. № 3.
123. Stellakis H. M., Valavanis K. P. Fuzzy logic-based formulation of the organizer of intelligent robotic systems // J. Intell. Robot. systems. 1991. V. 4. № 1.
124. Alang-Rashid N. K., Heger A. S. A method for transforming operators' skill to fuzzy logic controller // Contr. Theory and Adv. Technol. 1992. V. 8. № 3.
125. Buckley J. J. Fuzzy I/O controller // Fuzzy Sets and Systems. 1991. V. 43. № 2.
126. King R. E. Expert supervision and control of a large-scale plant // J. Intell. and Robotic Systems. 1992. V. 5. № 2.
127. Ионов И. П., Кантор П. С., Ульянов С. В. Дуальное управление искусственной вентиляцией легких с использованием нечеткого регулятора в цепи обратной связи // Мед. техника. 1989. № 1.
128. Karimi A., Isaka S., Sebald A. V. Use of simulated appealing in design of very high dimensioned minimax adaptive controllers // Proc. 23rd Asilomar Conf. Signals, Syst. and Comput. (Pacific Grove, Calif., Oct. 30 — Nov. 1, 1989). San Jose (Calif.), 1989. V. 1.
129. Fukui Y., Masuzawa T. Blood pressure regulation based on the fuzzy control algorithm: Application to the hypertensive chemotherapy for the cancer treatment // Proc. 2nd IFMBE Pan Pacif. Symp.: Technol. Med. — Dev. and Dir. (Melbourne, 24-26 July, 1989). Melbourne, 1989.
130. Ying H., Sheppard L. C., Tucker D. M. Expert-system-based fuzzy control of arterial pressure by drug infusion // Medical Progress Through Technology. 1988. V. 13. № 2.
131. Linkens D. A., Nie J. A unified real-time approach for use in intelligent control I, II // Int. J. Contr. 1992. V. 56. № 4.
132. Linkens D. A., Abbod M. F. Self-organising fuzzy logic control and the selection of its scaling factors // Trans. Inst. MC. 1992. V. 14. № 3.
133. Liang E., Rodriquez R. J., Husseiny A. A. et al. A systematic approach to the design and reliability analysis of a fault-tolerant controller I, II // Rel. Eng. and Syst. Safety. 1989. V. 24. № 4; V. 25. № 1; Reliable fuzzy fault tolerant controller. Patent USA. № 4985824. 15.01.1991.
134. Mullholand R. J. Designing expert controllers // IEEE Reg. 5 Conf. Efec. Eng. Challenges 1990's (Tulsa, Okla, March 9—11, 1987). N. Y., 1987.
135. Tzafestas S., Papanikolopoulos N. P. Incremental fuzzy expert PID control // IEEE Trans. Ind. Electr. 1990. V. 37. № 5.
136. Zhu Z., Dai G., Yu T. Design and implementation of an expert intelligent controller // Inf. and Contr. 1988. № 1.

137. *Jia L., Zhang X.* Intelligent multiobjective optimal control and its application // *Inf. and Control.* 1992. V. 21. № 1.
138. *Luo A., Lu Y.* Expert PID controller and its application // *Inf. and Contr.* 1992. V. 21. № 3.
139. *Wu Q.-q., Zhou J., Gao J.-g.* A kind of self-tuning expert controller and its application // *J. Sci. Instrum.* 1992. V. 13. № 1.
140. *Yager R. R.* Implementing fuzzy logic controllers using a neural network framework // *Fuzzy Sets and Systems.* 1992. V. 48. № 1.
141. *Shoureshi R., Rahmani K.* Derivation and application of an expert fuzzy optimal control system // *Fuzzy Sets and Systems.* 1992. V. 49. № 2.
142. *Qiao W. Z., Zhuang W. P., Heng S. S.* A rule self-regulating fuzzy controller // *Fuzzy sets and Systems.* 1992. V. 47. № 1.
143. *Basu A.* Expert systems in control engineering: A review of the perspective // *Tete Techn. Rev.* 1991. V. 8. № 3.
144. *Алиев Р. А., Абдикеев Н. М., Шахназаров М. М.* Производственные системы с искусственным интеллектом. М.: Радио и связь, 1991.
145. *Алиев Р. А., Церковный А. Э., Мамедова Г. А.* Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат, 1991.
146. *Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Коровин С. Я.* Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990.
147. *King K.-H.* A rule-based approach control system: Expert adaptive fuzzy logic control system // *Chem. Asia'89 and Instrum. Asia'89: Process Plant (Singapore, 23-25 May, 1989).* Singapore, 1989. Sess. 5.
148. *Мальшиев Н. Г., Берштейн Л. С., Боженюк А. В.* Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. М.: Энергоатомиздат, 1991.
149. *Dote Y., Bose B. K.* Fuzzy CAD for variable structure PI(D) controller // *IECON'89: 15th Annu. Cont. IEEE Ind. Electron. Soc. (Philadelphia, Pa, Nov. 6-10, 1989).* № 4. 1989. V. 1.
150. *Кацурагава М.* Библиотека программ FZY-LIB и редактор FZY-EDP на нечеткой логике // *Отомэсэн,* 1990. Т. 35. № 4.
151. *Arikawa H.* Fuzzy controller // *Hydraul. and Pneum.* 1989. V. 28. № 8.
152. *Градецкий В. Г., Ульянов С. В., Черноусько Ф. Л. и др.* Мобильные системы с роботами вертикального перемещения // *Изв. АН СССР. Техн. кибернетика.* 1991. № 6.
153. *Канэда М., Номура Д., Курио Т. и др.* Нечеткая экспертная система для оценки размера и очага пожара // *Опэрэсенду Рисати.* 1990. Т. 36. № 8.
154. *Lee C. C.* Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller I, II // *IEEE Trans. Syst. Man, and Cybern.* 1990. V. 20. № 2.
155. *Gupta M. M., Qi J.* Design of fuzzy logic controllers based on generalized T-operators // *Fuzzy Sets and Systems.* 1991. V. 40. № 3.
156. *Кудинов Ю. И.* Нечеткие системы управления // *Изв. АН СССР. Техн. кибернетика.* 1990. № 5.
157. *Batur C., Kasparian V.* Model based fuzzy control // *Math. Comput. Modell.* 1991. V. 15. № 12.
158. *Raju G. V. S., Zhou J., Kisner R. A.* Hierarchical fuzzy control // *Int. J. Control.* 1991. V. 54. № 5.
159. *Zhang H., Wu Q.* Analysis and improvement of the fuzzy control algorithm // *J. Navjing Aeronaut. Inst.* 1991. V. 23. № 4.
160. *Ishizuka O., Tung Z., Tanno K. et al.* Fuzzy control system with 5-rule based model // *Bull. Fac. Eng. Univ. Miyazaki.* 1991. № 37.
161. *Mizumoto M.* Fuzzy control under various fuzzy reasoning methods // *Inf. Sci.* 1988. V. 45. № 2.
162. *Buckley J. J., Ying H.* Fuzzy controller theory: Limit theorems for linear fuzzy control rules // *Automatica.* 1989. V. 23. № 3; Fuzzy controller: Further limit theorems for linear control rules // *Fuzzy Sets and Systems.* 1990. V. 36. № 2; Fuzzy control theory: A nonlinear case // *Automatica.* 1990. V. 26. № 3.

163. Алиев Р. А., Захарова Э. К., Ульянов С. В. Нечеткие модели управления динамическими системами // Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибернетика. М.: ВИНТИ АН СССР, 1990. Т. 29; 1991. Т. 32.
164. Inoue H. Sino-Japan joint meeting on fuzzy sets // SICE. 1991. V. 9. № 5.
165. Yamakawa T. Stabilization of an inverted pendulum by a high-speed fuzzy logic controller hardware system // Fuzzy Sets and Systems. 1989. V. 32. № 2.
166. Berenji H. R., Chen Y. Y., Lee C. C. et al. An experiment-based comparative study of fuzzy logic control // Proc. Amer. Contr. Conf. (Pittsburgh, Pa, June 21—23, 1989). Green Valley (Ariz.), 1989. V. 3.
167. Jang J.-S., Chen Y. Y. State feedback effects in fuzzy logic control: A fuzzy modelling approach // IEEE Intern. Conf. Syst., Man, and Cybern. (Los Angeles, Calif., Nov. 4—7, 1990). N. Y., 1990.
168. Hayashi I., Nomura H., Wakami N. Artificial neural network-driven fuzzy control and its application to the learning of inverted pendulum system // Proc. III Congress Fuzzy Systems (June 15—23, Siettle). Wash., 1989.
169. Jang J.-S. Self-learning fuzzy controllers based on temporal back propagation // IEEE Trans. Neural Networks. 1992. V. 3. № 5.
170. Jang S., Araki M. Mathematical analysis of fuzzy control systems and on possibility of industrial applications // Trans. Soc. Instrum. and Contr. Eng. 1990. V. 26. № 11.
171. Saito T., Togawa K. Controls of inverted pendulum: By the technuque using the analog control elements // Res. Repts Nagaoka Techn. Coll. 1991. V. 27. № 2.
172. Terano T., Masui S., Tanaka K. et al. Manual control of an intrinsically unstable system and its modelling by fuzzy logic // Inf. Sci. 1988. V. 45. № 2.
173. Hamada K., Matsushima K. On the human operator's fuzzy model in a manual control system // Trans. Soc. Instrum. Contr. Eng. 1988. V. 24. № 5.
174. Lin C. E., Sheu Y. R. A hybrid-control approach for pendulum-car control // IEEE Trans. Industr. Electr. 1992. V. 39. № 3.
175. Ding J. PID control algorithm for on-line auto-tuning of parameters // J. China Text. Univ. 1989. V. 15. № 3.
176. Kwok D. P., Wang P., Li C. K. A combined fuzzy and classical PID controller // Microprocess. and Microprogramm. 1991. V. 32. № 1—5.
177. He M., Lü Y. Hybrid intelligent controller // Inf. and Contr. 1988. № 4.

Москва
ВЦ РАН
ТОО «Роботикс»

Поступила в редакцию
30.V.1993