

**НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ
РЕГУЛЯТОРОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.**

**I. НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ.**

Отмечается повышенное внимание ученых многих стран к исследованиям в области разработок интеллектуальных автоматических управляющих систем на основе нечетких моделей регуляторов. Подчеркивается увеличение спроса на такие системы в промышленности и в быту, рост капиталовложений в исследование и разработку опытных и коммерческих образцов указанных систем. Приведены сведения по технико-экономическим и научно-организационным вопросам разработки моделей нечетких регуляторов и систем управления, конкретные примеры их построения и реализации.

Введение. Последние три десятилетия наблюдался спад интереса к прикладным аспектам теории автоматического управления, о чем свидетельствует существенное сокращение числа отечественных публикаций в этой области. При этом по данным [1] более чем в пять раз снизилось число статей по аппаратным средствам автоматики и примерно в три раза по объектам управления. Цель данной работы, содержащей четыре части, состоит в частичном восполнении отмеченного пробела в отечественной литературе и освещении необходимых аспектов (от теоретических основ до маркетинга) становления нового направления в теории управления — нечетких моделей интеллектуальных регуляторов и систем управления. Последние несколько лет (период с 1980 г. по настоящее время) параллельно с традиционными исследованиями интенсивно ведутся работы по практическому внедрению нечетких регуляторов, систем управления и экспертных систем в промышленную и непромышленную сферы [2]. По мнению экспертов [3—11], приоритет по практическому коммерческому использованию результатов теории нечетких моделей управления принадлежит японским фирмам. К настоящему времени известно более 400 практических применений нечетких регуляторов и систем управления [12]. Капиталовложения в исследования и разработку опытных образцов в этом направлении распределяются (в миллиардах американских долларов США) [13] следующим образом: Япония — 2, США — 0.2, Европа — 0.3 в 1990 г., Япония — 2, США — 0.8, Европа — 1 в 1995 г., Япония — 6, США — 3, Европа — 7 в 2000 г. Такая интенсификация разработок и соответствующих материальных затрат основана на тщательном планировании и подробном маркетинге (с апробацией на четырех международных симпозиумах в период с 1987 по 1991 гг. и анализом научно-организационных аспектов промышленных разработок). Данным процессам предшествовал длительный период (с 1970 по 1980 гг.) исследовательских работ по разработке методов анализа, синтеза, моделирования и проектирования оптимальных структур моделей нечетких регуляторов и систем управления [2, 3, 14—26].

Все используемые в данной работе понятия и определения теории нечетких моделей регуляторов и систем управления подробно рассмотрены в [14—17, 20] и по мере необходимости будут приведены в соответствующих местах текста.

Изложение материалов данной работы построено следующим образом. В первой части даются основные сведения по технико-экономическим и научно-организационным вопросам разработки моделей нечетких регуляторов и систем управления,

приведены конкретные примеры построения и реализации таких систем. Вторая часть посвящена описанию особенностей разработки и динамического анализа структур интеллектуальных систем управления, основанных на знаниях. Третья часть содержит анализ конкретных структур интеллектуальных нечетких регуляторов и описание их приложений в различных проблемно-ориентированных областях, освещены вопросы программно-аппаратного обеспечения и построения систем проектирования промышленных нечетких регуляторов. Описание структур нечетких систем управления и экспертных систем, реализованных в промышленной и непромышленной сферах, а также перспективных направлений разработки нечетких интеллектуальных систем управления приведено в четвертой части данной работы.

1. Прикладные аспекты научно-организационных и технико-экономических вопросов разработки нечетких систем управления. Первые результаты (1975 г.) моделирования динамического поведения нечеткого регулятора [17, 27] и внедрения в 1980 г. первой нечеткой системы управления на цементном заводе в Дании [28, 29] (нечеткая система управления основывалась на моделировании поведения человека-оператора при управлении печью диаметром 5 м и длиной 165 м для производства цемента из известняка и глинозема; разработка (F. L. Smidth) показали высокую эффективность использования нечетких регуляторов и систем управления в процессах управления сложными нелинейными динамическими объектами. Среди наиболее ярких примеров приложений теории моделей нечетких регуляторов и систем управления была также система управления движением поездов метрополитена линии Нанбоку в г. Сендай (220 км севернее г. Токио, префектура Мияги, Япония), реализованная в июле 1987 г. Линия длиной 13,6 км соединяет 16 станций. Система управления, ранее реализованная на ПИД-регуляторах, не обеспечивала требуемой точности останова и комфортности движения при отправлении или торможении поезда. Новая нечеткая система управления гарантирует точность останова поезда менее 7 см от заданной точки, высокую комфортабельность движения и снижение до 35% энергозатрат. Другим примером является система управления и контроля процесса хлорирования для очистки воды городской сети водоснабжения в г. Сагамихара (префектура Канава, Япония). Нечеткий контроллер использует 47 логических лингвистических правил вывода, из которых 15 правил относятся непосредственно к выбору количества добавок хлора в биохимическом процессе очистки воды, а остальные 32 правила учитывают сезонные условия года и влияние внешней среды. Нечеткий контроллер осуществляет текущий контроль через каждые 5 минут вместо существенно нелинейной системы управления. Высокий уровень эффективности нечетких регуляторов достигнут в решении задач группового управления грузоподъемными лифтами в высотных зданиях. Фирмой Mitsubishi Electric Corp. разработана нечеткая система управления одиночным и группой лифтов, позволяющая снизить время ожидания лифта до 1 мин на 15—20%, а для времени ожидания свыше 1 мин на 30—40%. Ряд других примеров можно найти в [2—8, 18, 24, 25] и в п. 4 настоящей работы.

Следует отметить, что к настоящему времени известно около 200 практически внедренных реальных моделей нечетких регуляторов и интеллектуальных систем управления с применением экспертных систем. Среди полученных результатов достаточно отметить замечание известного специалиста в данной области М. Сугено [4]. В Японии известно более 2000 проектов по разработке экспертных систем. Среди этих проектов только 20—40% имели практический успех. В свою очередь, 80 проектов экспертных нечетких систем из 100 проектов имели практический успех, причем 90% из этих 80 проектов используются в инженерной практике, а остальные проекты — в непромышленной сфере. Среди последних отметим экспертную медицинскую систему Thyroid Cancer Image Diagnosis System, разработанную в центре Kawasaki Medical School [30]. Опытная эксплуатация данной экспертной системы показала, что точность диагностики при исследовании опухолевых заболеваний внутренних органов достигает 92%, в то время как

опытные врачи-специалисты на тех же объектах достигали точности диагностики 83%. К настоящему времени созданы [31—33] гибридные медицинские экспертные системы с глубинным и свободным форматом представления знаний, обратным нечетким логическим выводом для выбора протезов и диагностики качества протезирования нижних конечностей инвалидов (экспертная система «Даша»). Новый уровень интереса к нечетким системам возник после проведения научным центром Johnson Space Centre модельных и натуральных экспериментов с бортовой системой управления космического летательного аппарата типа Шаттл на базе нечеткого контроллера. Результаты экспериментов показали, что нечеткая система управления на 25% эффективнее действий человека-оператора и типовой системы управления на ПИД-регуляторе. В результате в сентябре 1987 г. Национальная федерация США по исследованию и освоению космического пространства использовала технологию применения нечетких контроллеров для бортовой системы управления космических летательных аппаратов. Основой данного нечеткого контроллера является нечеткий процессор, разработанный Ямакавой и переданный НАСА в эксплуатацию на два года с последующим внедрением в промышленность. С 1990 г. началось широкое применение нечетких регуляторов в бытовой аппаратуре типа пылесосов, стиральных машин, масляных обогревателей с воздушным обдувом, бытовых кондиционеров воздуха, домашних холодильников и др. [34].

Полученные практические результаты привлекли внимание к данной области многих исследователей. Достаточно указать на тот факт, что издано свыше 5000 научных работ (из них более 200 монографий) по теории и применению нечетких систем. В Китае работают около 3000 специалистов, примерно по 500 исследователей работают в США, Индии, Европе и странах СНГ, от 800 до 1000 исследователей — в Японии. Помимо национальных, европейской и международной ассоциаций исследователей нечетких систем создан ряд крупных фирм и лабораторий, занимающихся специально вопросами разработки и внедрения коммерческих программно-аппаратных продуктов и средств для построения нечетких интеллектуальных систем. В их число входят фирмы Togai Infra Logic, Omron, Micro Devices, Японская международная лаборатория LIFE (International FUZZY Engineering Research) и др. [3, 4, 8—10, 13]. Фирма Togai Infra Logic (Калифорния, Ирвайн) является первой фирмой, производящей чипы (кристаллы) на нечеткой логике. В настоящее время разработано программное средство TIL-shell, включающее расширение языков Ассемблера, Си для первого цифрового нечеткого логического чипа FC 110. В LIFE (префектура Канагава, г. Канаи, округ Июкогама), возглавляемой Т. Терао, работают от 30 до 300 сотрудников в трех лабораториях площадью 500 м². Лаборатория основана в 1989 г. и занимается вопросами разработки и промышленного внедрения нечетких систем на коммерческой основе по трем направлениям: нечеткие системы управления (исследовательская группа фирмы Omron, руководитель Т. Ямакава); процессы обработки нечеткой информации (фирма Matsushita, руководитель Т. Такаги); нечеткие компьютерные системы (фирма Hitachi, руководитель С. Ясунобу). Штат лаборатории состоит из временных сотрудников группы А (с годовым контрактом и бюджетом 8.9 млн. долл.) и сотрудников группы Б (постоянные сотрудники, годовой бюджет 3.4 млн. долл.). Лаборатория образована консорциумом из 48 транснациональных компаний и имеет бюджет 45 млн. долл. на 5 лет. Предполагается, что до 1995 г. в Японии будет израсходовано около 4.2 млрд. иен на разработку промышленного образца нечеткого процессора. Исследователи работают по двум программам (одна в рамках заданий лаборатории, а другая разрабатывается по инициативе исследователя) с объемом работ в 130 чел.-лет. Фирма Omron специализируется на разработках нечетких контроллеров и чипов на СБИС. Так, Ямакава разработал два типа новых аналоговых аппаратных средств для обработки нечеткой информации: первый чип осуществляет аппаратную реализацию композиционного (min — max)-правила логического вывода Заде, а второй — перевод нечетких значений сигнала управления в четкие числовые значения («дефазификатор») по методу центра тяжести. Продемонст-

рированный в 1987 г. опытный образец нечеткого контроллера в 100 раз по скорости превосходил традиционные ПИД-регуляторы. Фирма Omron затратила 3.3 миллиарда американских долларов на производство промышленных систем управления на базе нечетких чипов. При этом только в 1994 г. фирмой Omron Tateitsi Electronics Comp. предполагается выпустить продукции на базе нечетких процессоров и систем управления на сумму до 100 млрд. иен (1.3 млрд. марок); в частности, нечеткие контроллеры типа FZ-3000 и FZ-5000, которые реализуются на персональных ЭВМ типа NEC-PC-9801 с временем вывода до 40 нечетких логических правил от 400 до 5 мс. Программное обеспечение типа FS-2000 позволяет реализовать на одном чипе до 40 логических правил, стоимость которого составляет 5200 марок. Отметим также, что модель нечеткого процессора FC110 фирмы Togai может быть использована в качестве сопроцессора к стандартным персональным ЭВМ (ПЭВМ) совместно с компилятором FUZZYC стоимостью от 80 до 1000 долл. Для совместных с ПЭВМ типа PC компилятор стоит 4950 долл., а для версий рабочих станций типа SUN Apollo и Sony — 9900 долл. Согласно [8], в 1984 г. фирма Omron приобрела у Ямакавы 6 патентов и в 1988 г. уже разработала опытные образцы нечетких чипов и контроллеров; в 1989 г. фирма производила до 10 различного вида контроллеров, а на презентации разработок фирмы Omron было представлено 60 демонстрационных образцов продукции, основанных на нечеткой логике. К 1990 г. было запатентовано 600 разработок на нечеткой логике, а в 1991 г. число патентов возросло до 700, причем 40 из них составляют автономные устройства с нечеткой системой управления. Фирма Office of Computers and Business Equipment опубликовала в 1992 г. обзор [35], в котором описаны 350 патентов (в т. ч. 319 принадлежит японским фирмам) из 30 проблемно-ориентированных областей применения нечетких контроллеров. Согласно [11], к концу 1991 г. в Японии запатентовано 1080 разработок на нечеткой логике: 347 приходится на 1990 г., а на 1991 г. — 533 патента. По мнению экспертов [3, 4, 7, 8, 36—40], в ближайшие годы около 70% всех разработок по интеллектуальным системам будут основываться на нечеткой логике; специалисты фирмы Omron, в частности, считают, что в течение 5 лет в Японии при проектировании в структурах интеллектуальных систем управления до 30% будут использоваться нечеткие контроллеры.

2. Программно-аппаратное обеспечение и особенности проектирования микропроцессорных нечетких регуляторов. Одним из возможных путей решения проблемы увеличения эффективности, мобильности и гибкости используемых систем управления является повышение «интеллектуальности» применяемых САУ, снижение уровня сложности программно-аппаратного обеспечения регуляторов и создание интегрированных «разумных» производств с прогрессивной технологией [2, 15, 20—25]. В общем случае основу проектирования интеллектуальных регуляторов составляет конструирование базы знаний с использованием различных методов поиска, извлечения и представления знаний [41—44]. Поэтому создание нечетких промышленных регуляторов базируется на принципах развивающейся теории систем с искусственным интеллектом [20, 21, 23—25, 45]. Данные вопросы рассмотрены во второй части настоящей работы. Для нечетких регуляторов, основанных в общем виде на знаниях и используемых в интеллектуальных промышленных САУ, существует как ряд преимуществ перед традиционными П-, ПИ- и ПИД-регуляторами [2, 23—25, 46—50], так и ряд ограничений [51, 52].

В основу представленной на рис. 1 из [2] аппаратной реализации структуры интеллектуальной системы управления с нечетким регулятором положен нечеткий процессор. В таких моделях снижение уровня сложности структурной реализации и соответствующего программно-аппаратного обеспечения достигается за счет применения встраиваемых специализированных микропроцессорных модулей на СБИС (как прототипов ЭВМ шестого поколения на нечетком процессоре) с заданным нечетким логическим выводом. Нечеткие логические регуляторы используют в своей основе концепции моделей нечеткой логики: модели нечеткой

импликации и композиционного правила логического вывода. Для нечетких регуляторов, использующих в базе знаний реализацию соответствующей модели продукционного нечеткого логического вывода на основе нечеткого процессора, традиционна следующая схема лингвистического описания: нечеткая импликация, нечеткие модификаторы, нечеткие логические связки, композиционное правило вывода и операторы перевода логико-лингвистического описания управления в четкие числовые значения (дефазификаторы). Здесь следует отметить, что аппаратную реализацию приближенных рассуждений в виде продукционных правил «если, то» с сотнями и тысячами нечетких импликаций трудно осуществлять в реальном времени на традиционных моделях ЭВМ. Поэтому соответствующие разработки инструментальных средств ведутся в направлении развития и усовершенствования элементной базы нечетких процессоров, а также структур самих процессоров (как специализированных нечетких ЭВМ, предназначенных для использования в автономном режиме или в качестве сопроцессора обычных ПЭВМ).

Для обработки нечеткой лингвистической информации требуются соответствующие блоки нечеткой памяти, обеспечивающие хранение нечетких слов (функция принадлежности нечеткого множества квантуется и представляется в виде n -элементного вектора, называемого нечетким словом) для осуществления многошагового нечеткого вывода. Двоичная триггерная схема, обеспечивающая запоминание битов информации, выступает в обычных ЭВМ как основной компонент блоков памяти. Соответствующее определение нечеткой триггерной схемы для нечетких блоков памяти предложено в [53—55] на основе понятий треугольных норм (конорм) и нечетких операторов отрицания. Построение более общих моделей нечеткого вывода на основе треугольных норм [56] и реализация блоков нечеткой памяти на основе нейронных сетей [57] позволяет существенно улучшить быстродействие и объем памяти нечетких процессоров.

Разработки структур специализированных процессоров баз нечетких знаний и нечеткого вывода развиваются также по нескольким направлениям в виде гибридных технологий построения нечетких процессоров. Как отмечено в [3], при реализации на ПЭВМ типа РС XT/AT с типовым 16 разрядным процессором 8086 время, требуемое на обработку процесса нечеткого логического вывода из набора 96 продукционных правил (5 входных переменных и 2 выходные переменные) составило 30 с. Для работы систем управления в реальном времени требуется значительно большее быстродействие.

Разработанный первый цифровой нечеткий процессор FC 110 на основе кристалла (чипа) нечеткого логического вывода представляет собой высокоэффективный сопроцессор для применения методов нечеткой логики и реализации нечетких алгоритмов управления в реальном времени [58—61]. Процессор FC 110 имеет: на одном чипе 256 бит оперативной памяти; байтовый формат данных; набор машинных команд составлен из ограниченного числа сложных инструкций (модификация RISC- архитектуры). Введены специальные команды для оценки левой и правой логических частей нечетких продукционных правил «если, то», а также для построения сложных составных правил. При этом процессор FC 110 с рабочей частотой 10 МГц имеет скорость обработки правила 35 мкс, скорость вывода логических правил 28000 в 1 с (процессор 80386 с частотой 20 МГц имеет соответственно 400 мкс и 2300 правил в 1 с). Наиболее целесообразно применять спецпроцессор FC 110 как нечеткий сопроцессор совместно с главной ЭВМ общего назначения, когда главный процессор выполняет все входные и выходные преобразования, а процессор FC 110 обеспечивает оценку состояния базы знаний [61]. Символьный внутрисхемный эмулятор FC 1101CE для процессора FC 110 создан для ускорения разработки, настройки и отладки прикладных интеллектуальных систем на нечеткой логике, в частности, для проектирования баз нечетких знаний экспертных систем [58, 59, 61]. Примером эффективного применения процессора FC 110 является его использование в структуре нечеткого контроллера [61, 62] при решении задачи управления устойчивым состоянием перевернутого маятника. Языком программирования для реализации базы не-

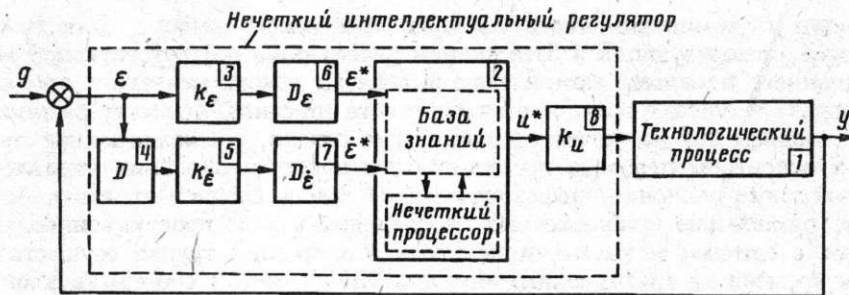


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы управления с нечетким регулятором [2]

четких знаний на нечетком процессоре FC 110 стал модифицированный нечеткий язык Си, разработан также нечеткий язык программирования μ FPL. С системой разработки нечетких версий языка Си можно объединить оболочки TIL-shell для построения программ управления с использованием баз знаний, сформированных с помощью версии TIL-shell. Сопроцессор FC 110 позволяет на базе ПЭВМ типа IBM PC AT обрабатывать более 370 тыс. нечетких продукционных правил (с двумя посылками) в 1 с, а также более 1 млн. булевых продукционных правил в 1 с; в частности, подсистема VME фирмы Togai обладает быстродействием четырех АТ, используя четыре параллельно срединных чипа FC 110 [63, 64].

При реализации нечеткого процессора на аналоговых СБИС достигается высокая скорость логического вывода продукционных правил (от 1 до 10 млн. нечетких логических правил в 1 с). В [65, 66] описаны два типа аналоговых инструментальных средств для обработки нечеткой информации: нечеткий процессор и нечеткий регулятор. Нечеткий процессор FUZ-M1 позволяет обрабатывать нечеткую информацию и осуществлять приближенные рассуждения в течение 100 нс; нечеткий регулятор (после поступления детерминированной информации) осуществляет процедуру управления на основе приближенного рассуждения. Здесь применяется СБИС, в которой на одном чипе реализуется нечеткое правило вывода типа обобщенного правила модус поненс. Ввиду актуальности применения нечетких процессоров в нечетких регуляторах рассмотрим на примере особенности построения конкретных структур систем, представленных на рис. 1.

П р и м е р. Допустим, что необходимо реализовать набор логических правил нечеткого алгоритма управления типа «если x есть положительно среднее (ПС) и y есть приблизительно ноль (ПН) и Z есть отрицательное (О), то S есть положительно среднее (ПС)» и т. д.

Структурная схема нечеткого логического вывода на основе метода центра тяжести приведена на рис. 2, а. Блок-схема аппаратной реализации нечеткого процессора, использующего логический нечеткий вывод на основе метода центра тяжести, приведена на рис. 2, б [65, 66]. Здесь входной сигнал меток (X, Y, Z) может быть реализован в виде П- и Л-образных функций принадлежности, а результат логического вывода — на 25 логических элементах. Значения ПН и ПС означают, что функция принадлежности реализована для этих величин в П-образной форме, а остальные значения — в Л-образной форме. Применение такого нечеткого регулятора к управлению стабилизацией перевернутого маятника также показало высокую эффективность по сравнению с традиционными методами управления в виде ПИД-регулятора [67].

На данных чипах можно реализовать от 10 (аналоговый чип) до 16 (цифровой чип) логических правил [3]. Применение параллельного вывода на нейронных сетях позволяет существенно повысить эффективность использования нечетких процессоров в виде встраиваемых печатных плат для САУ самого широкого промышленного назначения [68—70]. В этом случае количество реализуемых правил на одном чипе может достигать (в зависимости от технологии изготовления)

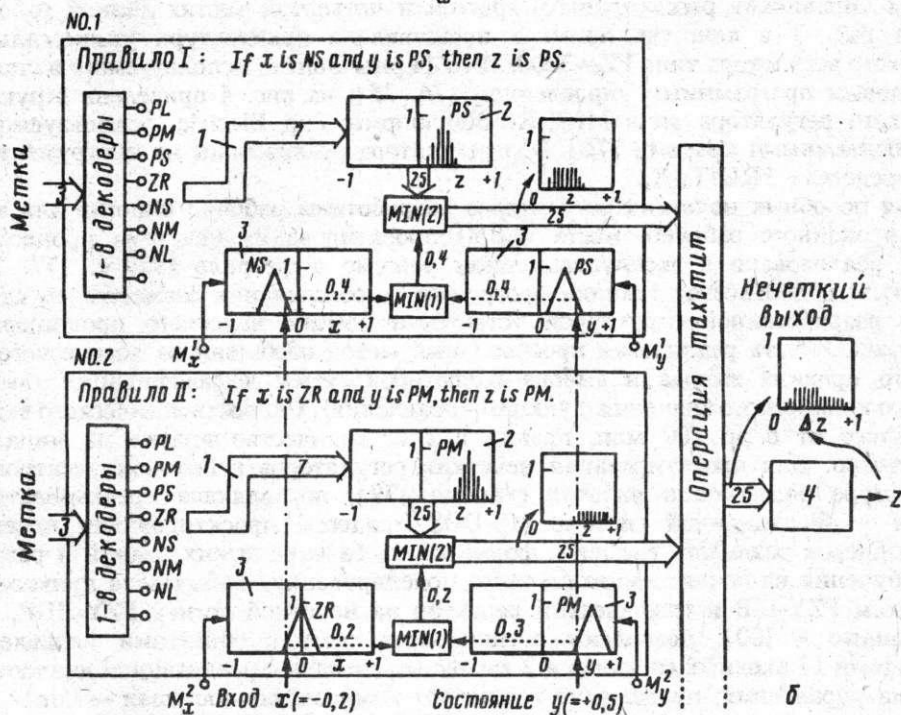
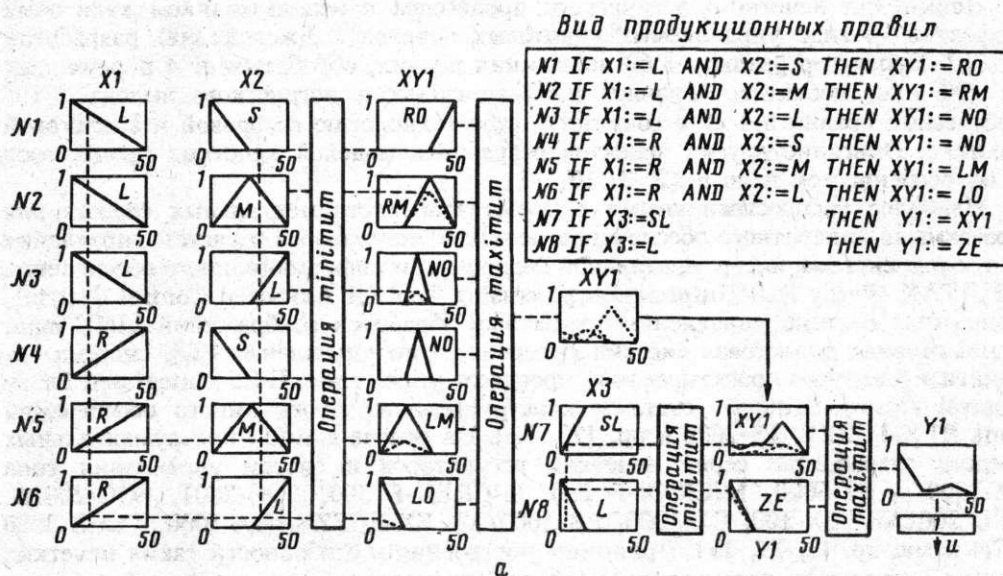


Рис. 2. Структурная схема нечеткого контроллера: а — схема нечеткого логического вывода по методу центра тяжести: L, R, sL, M, S, RO, RM, NO, LM, ZE — лингвистические переменные типа «слева», «справа», «немного левее», «средний», «малый» и т. п.; 1 — дефазификатор; u — четкое значение управления; б — структура нечеткого контроллера с аппаратной реализацией нечеткого логического вывода; 1 — шина выборки; 2 — генератор функции принадлежности; 3 — схема функции принадлежности; 4 — дефазификатор; z — выходной сигнал контроллера (четкие значения выходного сигнала управления); NS, PS, PM, ZR — лингвистические переменные типа «отрицательное малое», «положительное малое», «положительное среднее» и т. п.

от 117 до 256 правил, что существенно при разработке интеллектуальных САУ и экспертных систем с нечетким логическим выводом.

Новый вид нечеткого логического процессора с использованием квантовых эффектов (в виде управляемых квантовых переходов Джозефсона) разработан в [71]. Процессор реализует 60 логических правил, обрабатывает 4 переменных за 300 мкс (последнее означает наличие скорости логического вывода $2 \cdot 10^9$ логических правил в 1 с) и сочетает в себе технологию цифровой и аналоговой техники. Описание других проектов разработки моделей нечетких процессоров и их особенностей дано в [2, 3, 10, 72].

Наиболее распространенными разработками инструментальных средств для программно-аппаратного обеспечения нечетких регуляторов и систем управления являются: системы инструментальной поддержки и информационного обеспечения FRUITAX (Fuzzy RULe Information processing Tool for Advanced Control System), экспертная система управления процессами обработки изображений LINK map, компьютерная диалоговая система супервизорного управления FLS, система автоматизированного проектирования процессов управления IFCS (Integrated Fuzzy Control Desing System), системы конструирования программного обеспечения типа RPX-FUZZY, FS-2000 и др. [72, 73]. На основе данных инструментальных средств разработана серия нечетких регуляторов и систем управления типа FZ-1000 — FZ-5000, MICREX-F 250, MICREX-F 500, FOC-2001, FOC-2001A, FOC-2001AH, EX-100, EX-1000, EX-1000/32, EX-FUZZY, HX-1000, TDCS 3000 LCN и мн. др. [2, 25, 26]. Принципы построения и особенности таких нечетких систем управления рассмотрены в третьей и четвертой частях данной работы.

На рис. 3 в качестве примера представлена архитектура универсального нечеткого регулятора типа FZ—3000/3010 фирмы Omron, используемого в станках с числовым программным управлением [74, 75]; на рис. 4 приведена структура нечеткого регулятора типа MICREX-500 фирмы Fuji Electric, используемого в САУ подъемными кранами [76]. Оба регулятора реализованы на инструментальных средствах FRUITAX.

Для подобных нечетких регуляторов разработаны рабочие станции для автоматизированного рабочего места (АРМ) проектирования нечетких процессоров (АРМ реализовано в эксплуатационном режиме в феврале 1989 г. [77, 78]). При этом используется техника программного обеспечения совместно со специально разработанной структурой устройства памяти нечеткого процессора. В АРМ может быть реализован произвольный метод обобщенного логического нечеткого правила вывода и выбора операторов схемы дефазификации (выбора четкого конкретного значения функций управления). Скорость логического вывода составляет от 6 до 100 млн. правил в 1 с, количество правил на чипах не ограничено. Для проектирования нечетких регуляторов в бытовой электронной аппаратуре разработана рабочая станция [79], позволяющая реализовать на ПЭВМ в операционной системе MS-DOS процессы проектирования нечетких контроллеров реального времени, формировать базы нечетких знаний и режимы самообучения на основе имитационного моделирования. Библиотека прикладных программ FZY-LIB и графический редактор на нечеткой логике FZY-EDP, разработанные в [80], позволяют осуществлять связь с объектами управления, имеющими 17 входных сигналов и 2 выходных сигнала с реализацией диалогового режима управления; программно реализуют композиционное (max — min)- правило нечеткого логического вывода на ПЭВМ типа PC XT/AT. Комплексная система проектирования IFCS [81, 82] предназначена для разработки нечетких иерархических систем управления типа AS3000, J3100 реального времени, содержащих на нижнем уровне сбора и обработки данных нечеткие регуляторы. Инструментальные средства проектирования типа FCSS [83] и FUZZY CAD [84] предназначены для разработки структур нечетких регуляторов с использованием экспертных систем и процессов моделирования динамических систем с переменной структурой.

Таким образом, разработанные АРМ конструкторов на базе рабочих станций

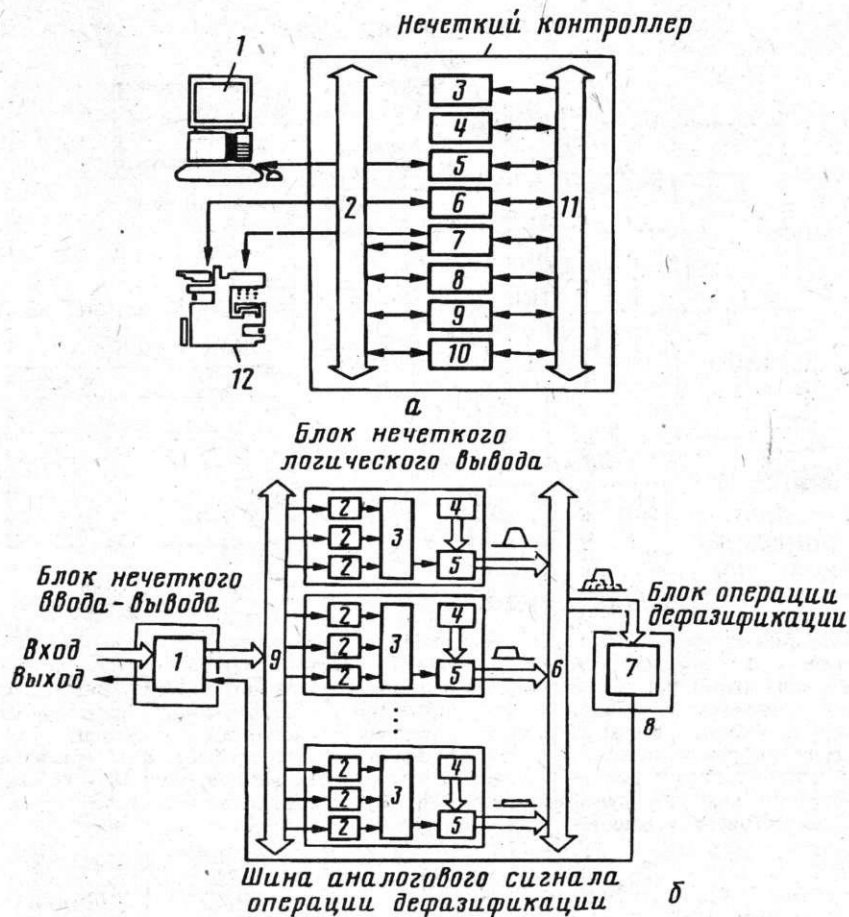


Рис. 3. Нечеткий контроллер: а — структура нечеткого контроллера: 1 — внешнее периферийное вычислительное устройство на базе персональной ЭВМ; 2 — аналоговая шина высокоскоростной передачи данных; 3 — арифметико-логическое устройство; 4 — блок памяти; 5 — устройство связи; 6 — блок цифрового ввода — вывода; 7 — блок нечеткого ввода — вывода; 8 — блок дефазификации (выбора четкого значения); 9, 10 — блок нечеткого логического вывода; 11 — общая шина передачи цифрового сигнала; 12 — станок с числовым программным управлением; б — схема нечеткого логического вывода в нечетком контроллере; 1 — схема выборки сигнала ввода — вывода; 2 — схема функции принадлежности сигнала логической посылки; 3 — схема операции \min значений функций принадлежности сигнала логической посылки; 4 — генератор функции принадлежности логического вывода; 5 — схема операции \min значений функций принадлежности логического вывода; 6 — схема операции \max значений функций принадлежности логического вывода; 7 — схема операции дефазификации; 8 — сигнал логического вывода по методу центра тяжести; 9 — шина входного аналогового сигнала

проектирования позволяют построить логические регуляторы, основу которых составляют нечеткие процессоры на СБИС. При этом по качеству переходных процессов и достижению целей управления построенные регуляторы превосходят традиционные П-, ПИ- и ПИД-регуляторы.

3. Примеры реализации нечетких моделей логических регуляторов и промышленных САУ. В качестве иллюстрации в данном разделе приведем конкретные примеры реализованных структур нечетких регуляторов и промышленных САУ, представляющих самостоятельный интерес в исследуемой предметной области.

Примеры нечетких моделей общепромышленных САУ. Разработанные структуры аппаратной реализации микропроцессорных нечетких регуляторов, представленные на рис. 1, успешно применяются в составе промышленных нечетких САУ [1,85—87].

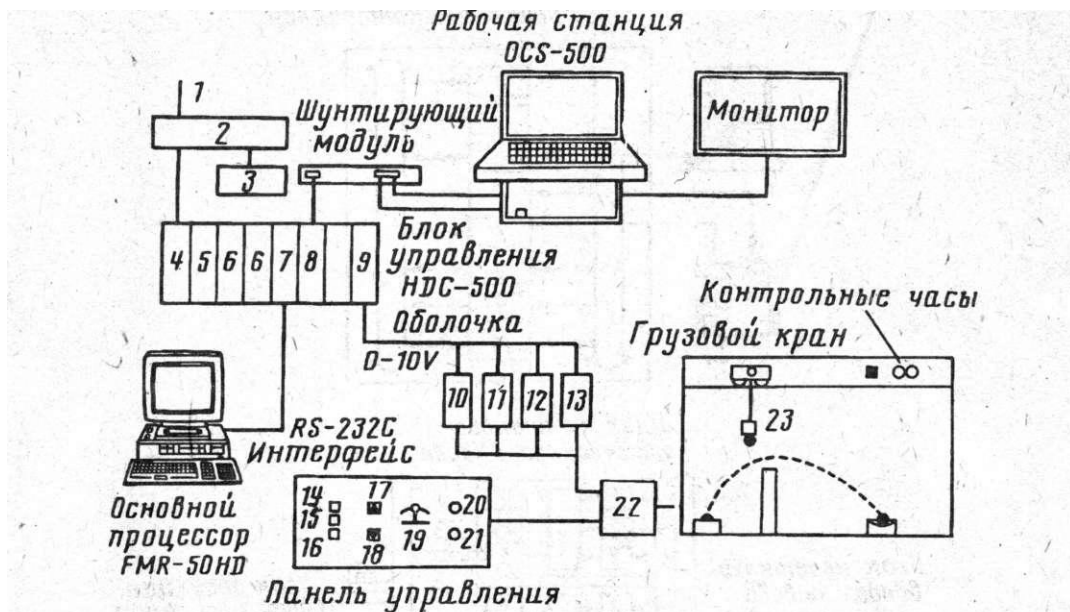


Рис. 4. Нечеткий контроллер MICREX: 1 — источник питания переменного тока 100 В; 2 — модуль шины питания; 3 — запасной источник питания; 4 — источник питания блока управления; 5 — функциональная клавиатура общей шины управления; 6 — клавиатура основного процессора; 7 — клавиатура интерфейса; 8 — клавиатура сети управления связью; 8 — модуль кольцевой сети связи; 10 — модуль аналогового ввода; 11 — модуль аналогового выхода; 12 — модуль цифрового входа; 13 — модуль цифрового выхода; 14 — кнопка автоматического управления; 15 — кнопка ручного управления; 16 — кнопка возврата; 17 — кнопка вертикального перемещения; 18 — кнопка горизонтального перемещения; 19 — рукоятка управления; 20 — кнопка пуска установки; 21 — кнопка остановки; 22 — устройство управления; 23 — электромагнит

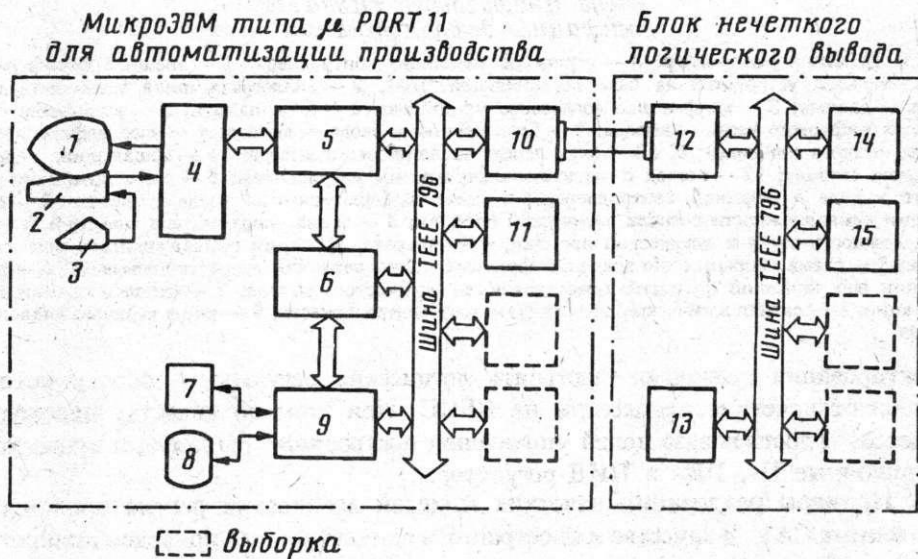


Рис. 5. Структурная схема нечеткой системы управления: 1 — дисплей; 2 — клавиатура; 3 — мышь; 4 — графический процессор; 5 — основной процессор; 6 — многопортовая память; 7 — накопитель на гибких магнитных дисках; 8 — накопитель на твердых магнитных дисках; 9 — файловый процессор; 10, 12 — канал связи шины передачи данных; 11 — общая память; 13 — терминал; 14 — нечеткий процессор; 15 — локальная память

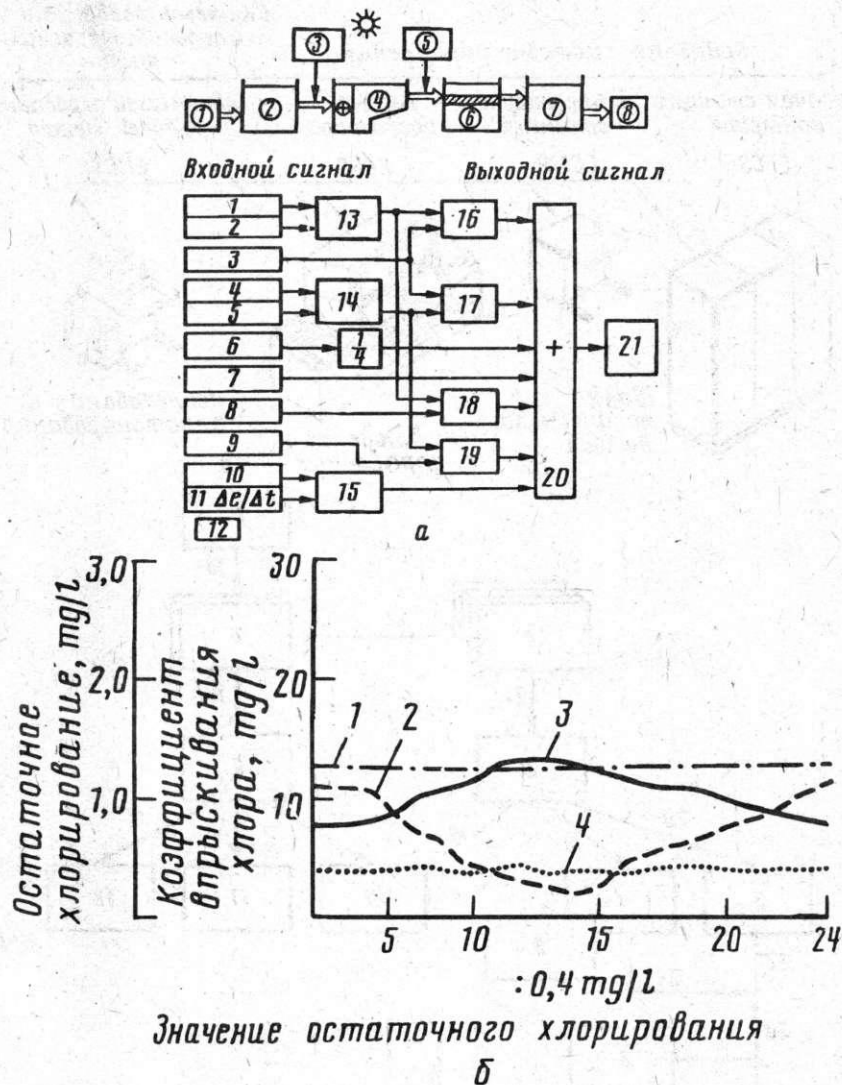


Рис. 6. Нечеткая система управления водоочистным сооружением: а — структурная схема водоочистного комплекса и сбора контролируемых параметров; 1 — источник воды; 2 — заборник воды; 3 — блок ввода порций хлорирования воды; 4 — отстойник; 5 — блок остаточного хлорирования; 6 — фильтрационный бассейн; 7 — водоочистное хранилище; 8 — сеть водоснабжения; 9 — блок прогноза погоды; 2, 3 — блок прогноза среднего уровня температуры воды; 4 — блок прогнозирования органического состава воды; 5 — блок прогнозирования содержания неорганических соединений в воде; 6 — блок формирования добавок активированного угля; 7 — блок дополнительной химической обработки воды; 8 — блок оценки текущего изменения погоды; 9 — блок текущей выдачи порции хлора; 10 — блок оценки изменения остаточного хлорирования воды; 12 — блок ручного ввода данных в блоки 1—9 о состоянии источника воды, в блоки 10—12 автоматического ввода данных; 13 — блок оценки инсоляции воды; 14 — блок назначения порций хлорирования воды; 15, 18, 19 — блоки коэффициентов коррекции впрыскивания порций добавок; 16 — блок коррекции метеорологических данных; 17 — блок коррекции основных параметров воды; 20 — блок логического суммирования; 21 — блок назначения инъекции хлорирования воды (мг/л); б — результаты применения нечеткой САУ для выбора концентрации хлорирования воды: 1 — ручное управление коэффициентом впрыскивания дозы хлора; 2 — ручное управление дозами остаточного хлорирования; 3 — нечеткий алгоритм управления коэффициентом впрыскивания дозы хлора; 4 — нечеткий алгоритм управления дозами остаточного хлорирования. Значение коэффициента расхода дозы впрыскивания хлора от традиционного управления составило 478 л/день, от нечеткого алгоритма управления — 459 л/день

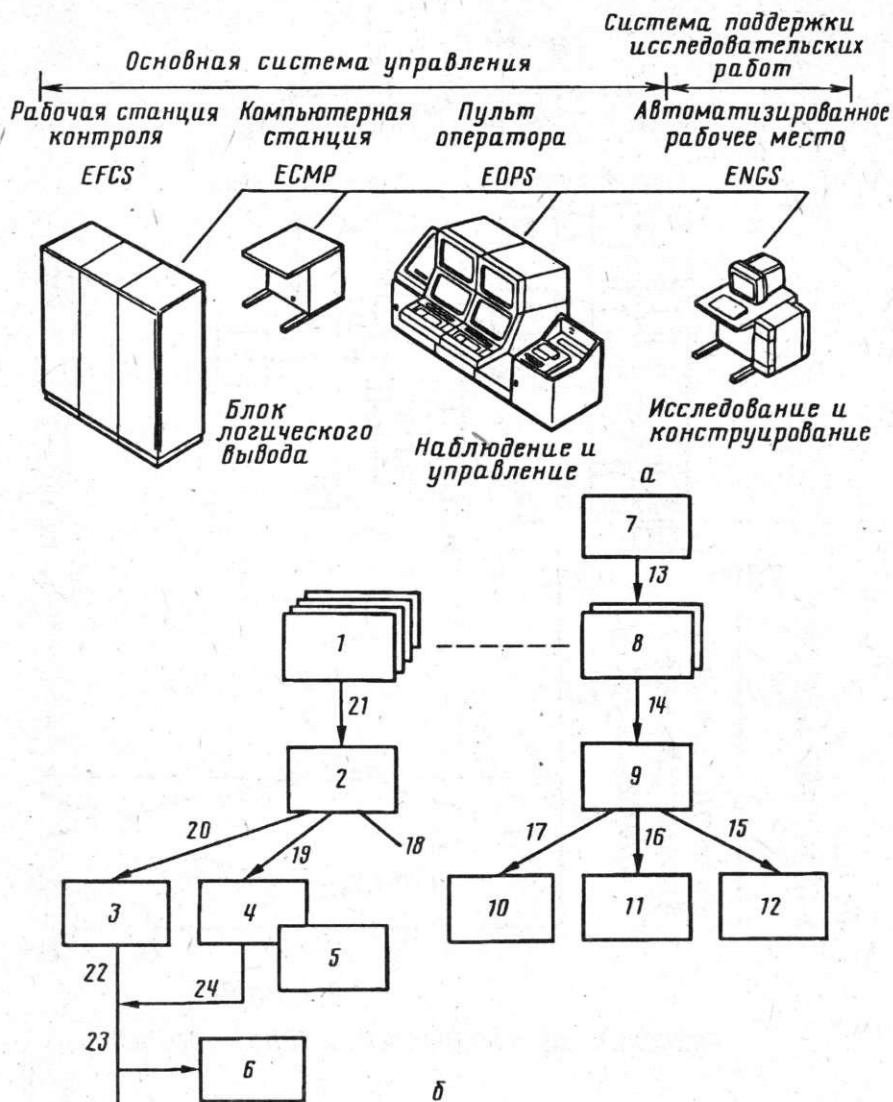


Рис. 7. Нечеткая САУ CENTUM — XL: а — структура нечеткой САУ; б — структура программного обеспечения: 1 — меню нечеткого программного обеспечения; 2 — меню базы знаний системы искусственного интеллекта; 3, 4 — оконный режим базы знаний; 5 — меню базы знаний; 6 — блок оконного режима группового выбора супервизорного управления; 7 — блок оконного режима условий нечеткого алгоритма управления; 8 — меню нечеткого управления; 9 — меню выбора условий логического вывода; 10 — блок оконного режима отображения условий логического вывода; 11 — блок оконного режима адаптивного управления; 12 — блок оконного режима текущего логического правила принятия решения; 13 — выбор максимума функций принадлежности; 14 — выбор вида логического вывода; 15 — текущее логическое правило; 16 — условия адаптации; 17 — отображение логического вывода; 18 — исключение; 19 — коррекция; 20 — пополнение базы знаний; 21 — проблемно-ориентированная база знаний; 22 — групповой ввод в базу знаний; 23 — ограниченная выборка; 24 — выборка из базы знаний

На рис. 5 показана структура нечеткой системы управления [85], используемой для контроля и управления водоочистным сооружением (рис. 6).

В [86] разработана универсальная интегрированная САУ типа CENTUM-XL. На рис. 7 показана структура программно-аппаратного обеспечения подобной системы для технологической установки контроля и производства профильной бумаги на бумагоделательной машине, изображенной схематично на рис. 8.

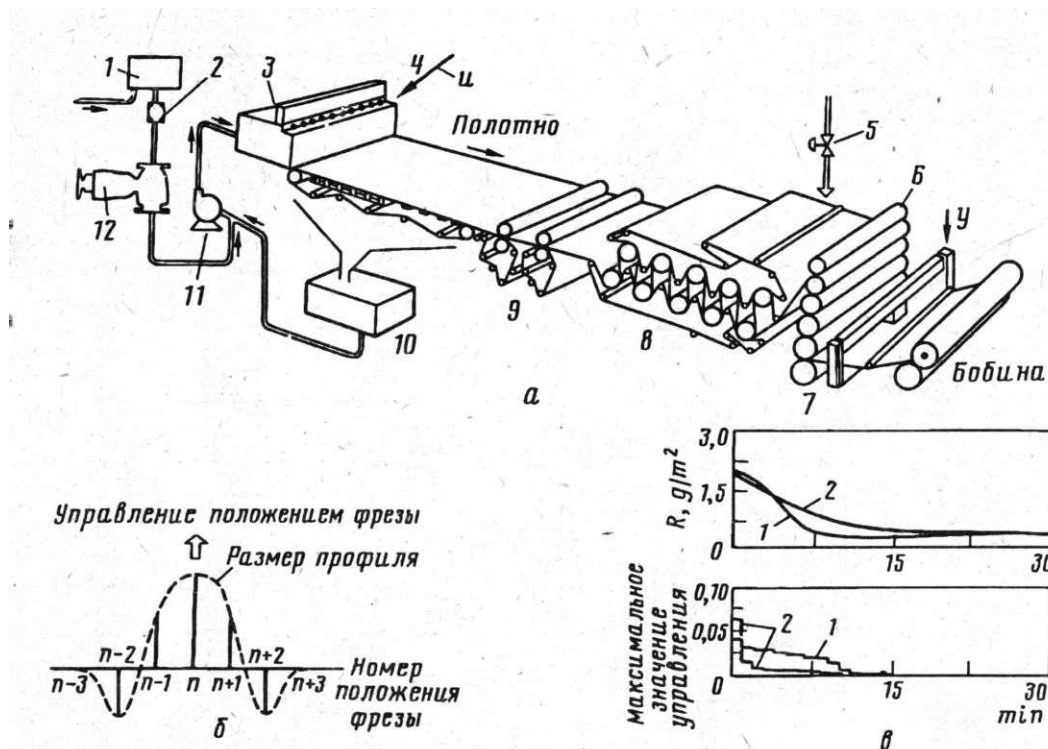
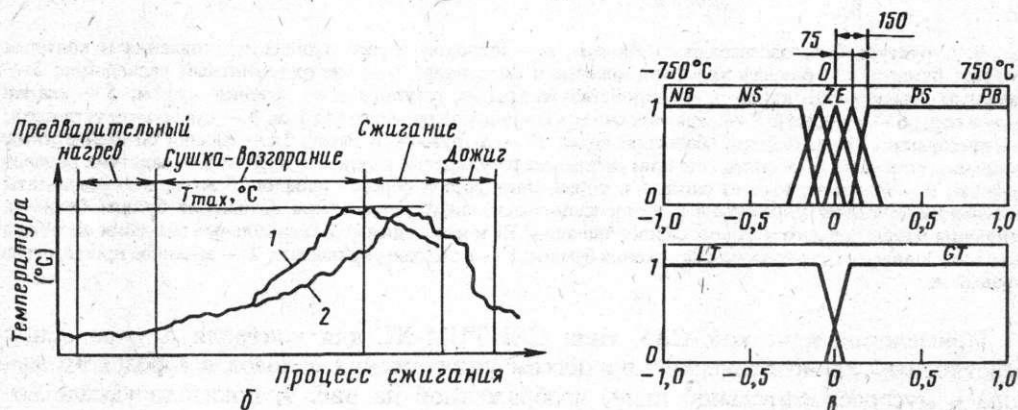
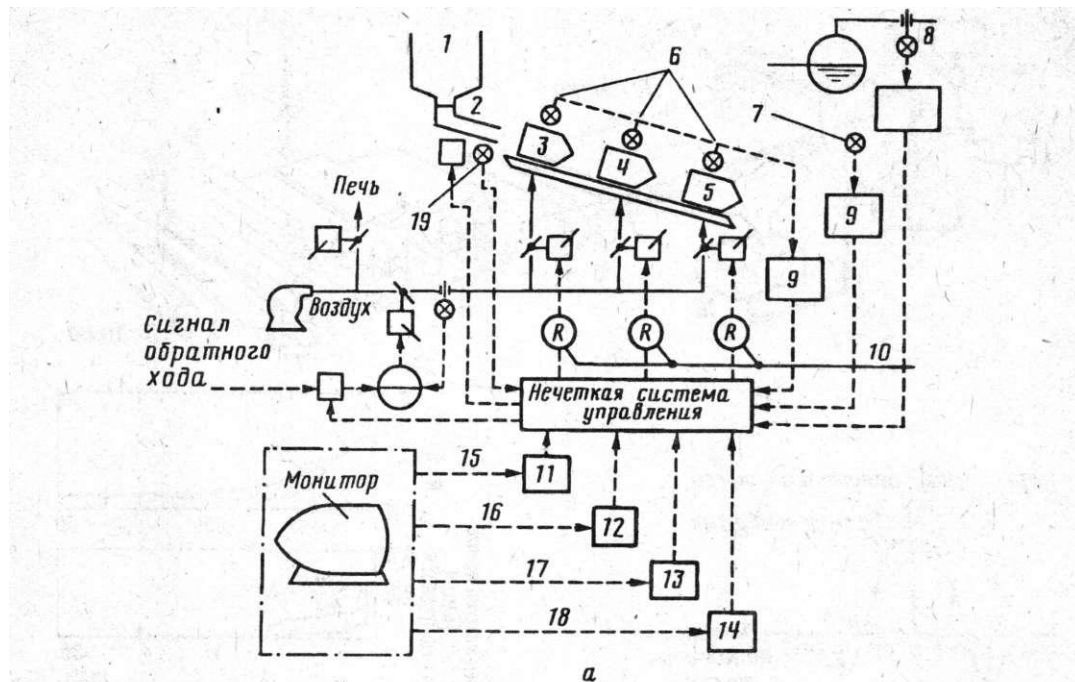


Рис. 8. Структура бумагоделательной машины: а — технологический процесс изготовления и контроля профиля бумаги: 1 — емкость хранения исходного материала; 2 — электромагнитный расходомер; 3 — напорный (выпускной) ящик; 4 — устройство раскрытия регулируемого сечения муфты; 5 — клапан подачи пара; 6 — каландар; 7 — задатчик выхода кондиционирующего воздуха; 8 — сушильная установка; 9 — прессшпан; 10 — заборник оборотной воды; 11 — загрузочный насос; 12 — клапан со стандартным проходным сечением; u — сигнал степени раскрытия регулируемого сечения муфты; y — задатчик размера профиля; б — вид контрольного сигнала и управления фрезой обрезки профиля бумаги; в — результаты применения нечеткого управления к компенсации начального возмущения натяжения бумаги (разница изменения максимального и минимального значений R) и необходимые максимальные значения амплитуд сигналов управления для контроля натяжения бумаги; 1 — нечеткое управление; 2 — заданное программное управление

Применение нечеткой САУ типа CENTUM-XL для контроля и управления безотходным технологическим процессом уничтожения отходов и городского мусора в мусоросжигательной печи, изображенной на рис. 9, показало удовлетворительные результаты.

Устройство управления и принятия решений в таких интеллектуальных системах реализуются на моделях нечетких инструкций и алгоритмов управления, обобщенных продукционных правил нечеткого логического вывода, усовершенствованных форм описания и глубинного представления знаний в экспертных системах. Рассмотрим теперь кратко примеры применения нечетких моделей логических регуляторов, построенных на знаниях и используемых в интеллектуальных промышленных САУ различных проблемно-ориентированных областей. Качественное описание применения нечетких моделей САУ дано на примерах разработки нечетких логических регуляторов, широко применяющихся при создании АСУТП, гибких производственных систем, робототехнических комплексов, систем управления сложными динамическими системами и т. п. Сравнение с традиционными объектами теории управления дает возможность показать отмеченные преимущества и особенности применения нечетких регуляторов в промышленных САУ.

Применение нечетких САУ в проблемно-ориентированных областях. Разработка структур универсальных нечетких контроллеров привела к широкому применению нечетких регуляторов и интеллек-



туальных САУ в различных областях [2, 25, 26]. Как отмечалось, одними из первых промышленных разработок нечетких САУ были системы управления на цементном заводе, поездами в метрополитене и бортовая система управления космического летательного аппарата типа Шаттл.

В последнем случае моделировался полет в течение часа, а аппарат находился в 100 м от основной станции. Требовалось сохранить ориентацию объекта управления на земную орбиту. Структура нечеткого регулятора ориентации искусственного спутника Земли была разработана в [88, 89]. На рис. 10 показаны общий вид спутника, структурная схема нечеткого регулятора и результаты моделирования нечеткого регулятора как многоуровневого реле задержки [88, 89]. Сравнение результатов моделирования нечеткого регулятора с традиционным регулятором с обратной связью управления по отклонению показало хорошие результаты работы нечеткого регулятора в составе САУ. При этом выбор параметров нечеткого регулятора осуществлялся по критерию устойчивости по Ляпунову, что обеспечивало робастность нечеткого регулятора в пространстве параметров при установленном уровне критического управления по тяговому усилию коррекции положения спутника.

вид сырья: мусор

Продукционные
правила
логического
вывода

NO	RULE	IF	THEN
17	AD	EO=NB DO=ZE S1=1	U2=PB
18	AD	EO=ZE DO=PB S1=1	U2=NB
19	AD	EO=PB DO=ZE S1=1	U2=NB
20	AD	EO=ZE DO=NB S1=1	U2=PB
21	AD	EO=NS DO=ZE S1=1	U2=PM
22	AD	EO=ZE DO=PS S1=1	U2=NS
23	AD	EO=PS DO=ZE S1=1	U2=NS
24	AD	EO=ZE DO=NS S1=1	U2=PS

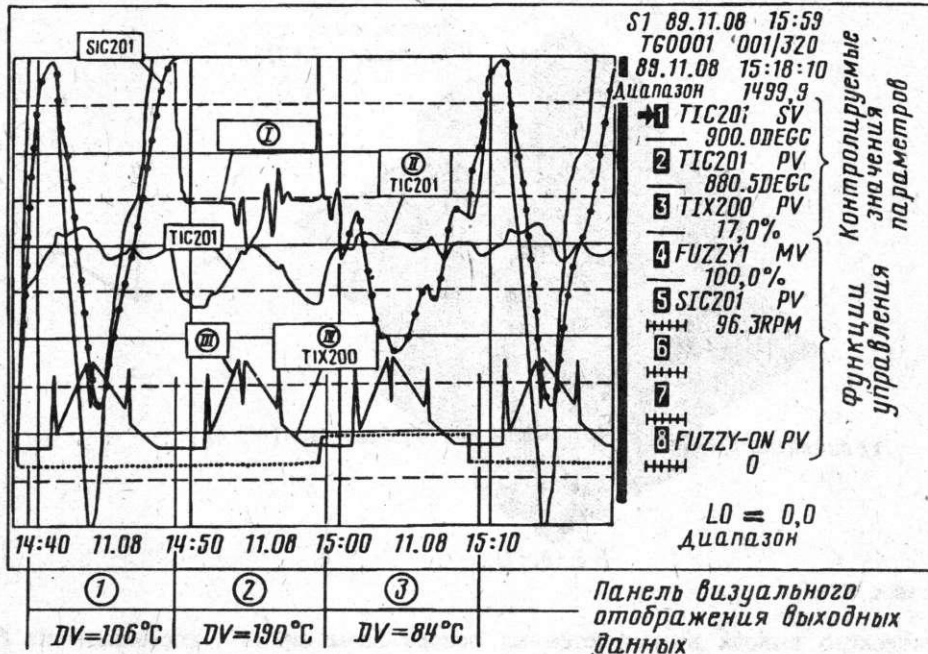


Рис. 9. Нечеткая система управления процессом сжигания мусора продуктов и промышленных отходов: а — структурная схема процесса уничтожения мусора: 1 — загрузочный люк; 2 — устройство подачи; 3 — сушка; 4 — сжигание; 5 — дожиг; 6 — датчики температуры; 7 — подача газа для поддержания температуры в печи; 8 — установка нормативных сигналов; 9, 11—14 — функция принадлежности; 10 — уставка коэффициента—отношения; 15 — уставка параметров оператором; 16 — теплотворность; 17 — количественная оценка влагосодержания; 18 — удельный объем; 19 — датчик скорости загрузки; б — изменение температуры в процессе горения: 1 — величина относительного влагосодержания; 2 — нормативная величина; в — вид функций принадлежности: NB, NS, ZE, PS, LT, PB, GT — лингвистические переменные типа «отрицательно большой», «отрицательно малый», «нуль», «положительно малый» и т. п.; г — вид продукционных правил и результаты управления на основе нечеткого ПИ-регулятора: I — нечеткий выход; II — температура печи; III — нарушение режима; IV — флуктуация калорий; 1 — выборочные значения процесса сжигания мусора при управлении ПИ-регулятором; 2 — выборочные значения для ПИ-регулятора при сыром мусоре; 3 — нечеткий регулятор управления сжиганием сырого мусора.

Общий вид нечеткого контроллера и результаты моделирования управления движением поезда метрополитена [90] представлены на рис. 11. Отмеченные достоинства в виде точности останова поезда, плавный ход (разгон и останов), комфортабельность движения и экономия электроэнергии обеспечивались используемым нечетким контроллером, системой сбора данных (см. рис. 11, а) на основе ультразвуковых датчиков и обработки информации на базе нечетких алгоритмов [90—92]. Система представляет программно-аппаратные средства моделирования и прогнозирования режима управления электропоездом метрополитена и подачи команд управления в реальном времени. Процесс нечеткого

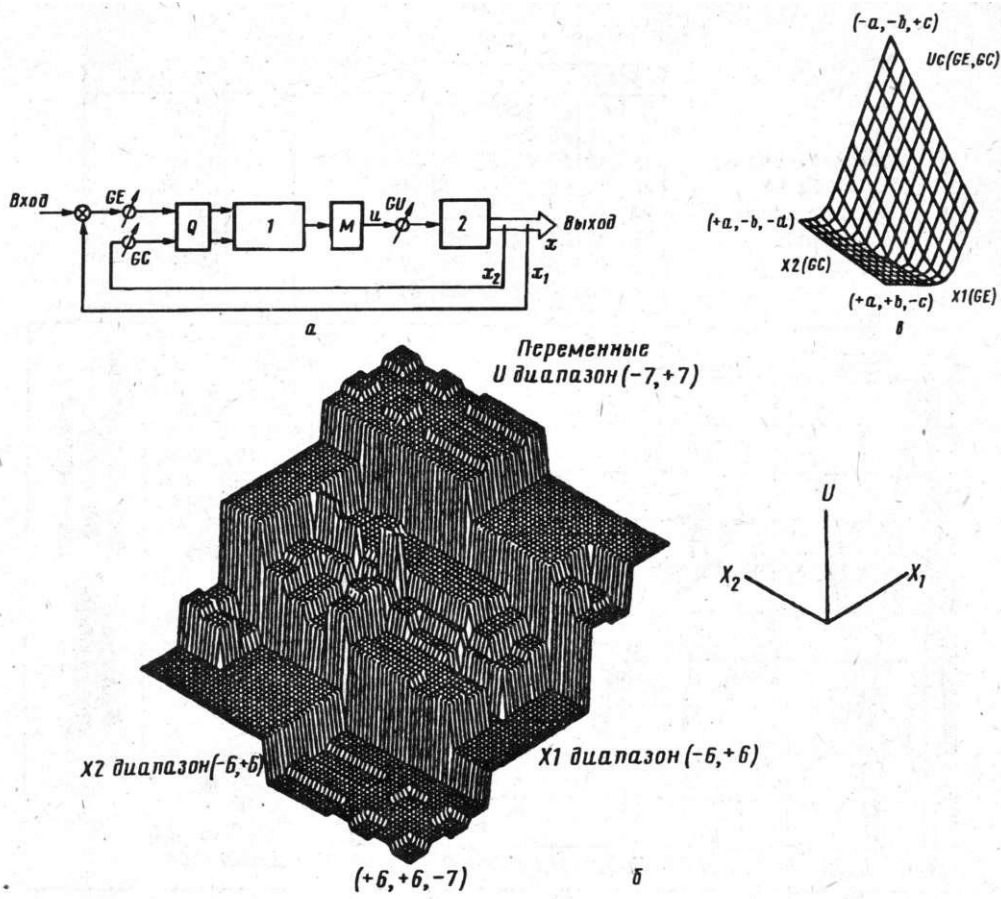


Рис. 10 а, б, в

логического вывода выполняется на основе базы знаний, состоящей из базы фактов и базы логических (продукционных) правил. В [93] приведены оценки результатов внедрения и эксплуатации (в течение 5 лет) системы с точки зрения точности позиционного управления остановом поезда. Оценка точности выполнялась на основании экспериментальных данных, полученных в 11395 случаях измерения позиции останова. В результате система обеспечивала точность обработки позиции останова ± 5 см в более чем 4.5 тыс. случаев; средняя точность составляла 3.57 см.

Применение нечеткой САУ в задачах управления вентиляторными установками [94, 95] в больших автодорожных туннелях на скоростных трассах проиллюстрировано на рис. 12. Из рис. 12, з видно, что в результате применения нечеткой САУ увеличилась пропускная способность туннеля, снизилось содержание окиси углерода в туннеле от выхлопных газов автомобилей, при этом в интервале от 5 до 20 ч требуется в 2.5 раза меньше включенных вентиляторов.

Пример использования нечеткого регулятора в аппаратах искусственной вентиляции легких (ИВЛ) [96] показан на рис. 13. Данный класс аппаратов позволяет реализовать так называемые щадящие режимы ИВЛ в процессах лечения и реабилитации пациентов [97, 98]. Ввиду важности данного примера для теории нечетких моделей динамических систем управления рассмотрим некоторые его методологические особенности.

Формирование обратных связей в структурах систем управления на нечетких регуляторах. В аппаратах ИВЛ действие исполнительного механизма (принятие решения) и конечный результат контро-

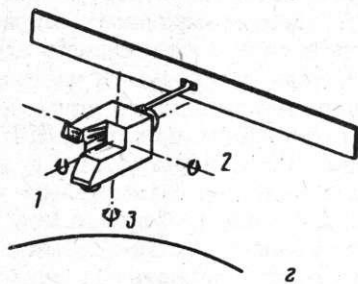
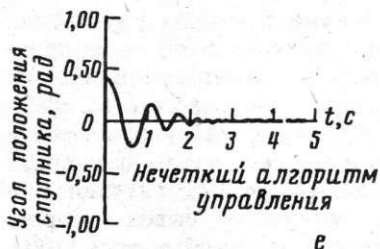
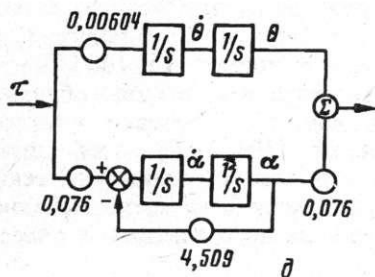


Рис. 10. Нечеткая САУ искусственным спутником: а — структурная схема нечеткого регулятора; 1 — производственные правила управления процессом, основанные на знаниях; 2 — процесс как объект управления (Е — ошибка, С — скорость изменения ошибки); б — моделирование нечеткого регулятора как многоуровневого реле задержки; в — вид критической поверхности по тяговому усилию; г — общий вид искусственного спутника: 1 — ось угла тангажа; 2 — направление полета вдоль оси качения; 3 — ось угла рыскания с ориентацией на центр земли; д — контур управления спутником; е, ж — результат моделирования угла положения (ориентации) спутника



лируются по двум логико-динамическим контурам обратной связи: физиологическому контуру системы внешнего дыхания (СВД) и контуру аппарата ИВЛ [96, 98]. Физиологический механизм взаимодействия данных логико-динамических контуров (каналов обратных связей) СВД и ИВЛ подробно описан в [96, 98] и осуществляет реализацию защитных отрицательных реакций естественного организма на действие аппарата ИВЛ. Процесс взаимодействия регулирующих нейроэндокринных центров СВД организма пациента и управляющих воздействий оператора аппарата ИВЛ реализует дуальное управление [99]. Функции оператора в данном случае выполняет нечеткий регулятор, имитирующий его деятельность на основе грубой модели объекта управления и экспертных оценок. Задачей дуального управления является распределение управляющих воздействий между аппаратом ИВЛ и системой регуляции внешнего дыхания. В этом случае гомеостаз естественного организма по каналам обратных связей СВД осуществляет адап-

тацию организма к управляющим воздействиям аппарата ИВЛ через уставку информативных параметров в виде отношения (f_c/f) частоты сердечных сокращений (ЧСС) f_c к частоте дыхания f . Установлено, что величина приемлемого для организма отношения (f_c/f) равна приблизительно 4. Если регулируется частота дыхания f , а ЧСС регистрируется, то получаем модель неинвазивного управляющего воздействия. При этом текущим непрерывным состояниям по каналу ИВЛ соответствуют дискретные состояния (f_c/f) по каналам СВД. В результате реализуется принцип дополнительности дуального управления (при взаимодействии двух антагонистических механизмов управления СВД и ИВЛ). Формализация описания взаимодействующих по принципу дополнительности логико-динамических каналов обратных связей приводит к необходимости использовать различные неклассические логики. Так, нечеткий регулятор (НР на рис. 13, а) в канале обратной связи рассматривается в классе лингвистических аппроксимаций на основе классической нечеткой логики, а логическое поведение второго канала СВД (реализующее отрицательные реакции естественного организма) подчиняется законам материальной импликации квантовой нечеткой логики [96, 100]. Таким образом, компенсаторные реакции дыхательного хемостата (второй канал обратной связи) описываются в общем случае в рамках моделей квантовой нечеткой логики. При этом, согласно результатам моделирования [101, 102], материальная импликация квантовой логики характеризуется наиболее строгим логическим выводом в классе многозначных (нечетких) логик, является более информативной и менее чувствительной к вариациям исходных данных по сравнению с классическими вариантами.

В общем случае формирование подобного рода обратных связей осуществляется в сложных системах лингвистическими аппроксимациями контуров управления и нечетких регуляторов с использованием принципа двухканальной инвариантности [2, 17]. При этом первый обобщенный канал регулирования по отклонению с компенсацией ошибки использует нечеткий регулятор, реализованный на принципах классической нечеткой логики; второй обобщенный канал управления и контроля состояния объекта предназначен для учета изменения взаимосвязанных информативных параметров состояния объекта в экстремальных ситуациях и использует нечеткий интеллектуальный регулятор, логический вывод которого реализуется на принципах квантовой (недистрибутивной) нечеткой логики [100]. Примером именно такой ситуации является разработка интеллектуальной САУ для аппарата ИВЛ, представленной на рис. 13. Управление дыхательным контуром ИВЛ осуществляется нечетким регулятором на базе классической нечеткой логики; нечеткий квантово-логический регулятор осуществляет контроль за взаимодействием дыхательного контура с дискретными состояниями сердечно-сосудистой системы в виде ЧСС (с которой дыхательная система находится в антагонистическом отношении) и корректировку соответствующих таблиц лингвистических правил принятия решения для выполнения условий инвариантности динамического поведения объекта управления. В этом случае учитываются указанные компенсаторные возможности гомеостаза целостного механизма.

Другим примером формирования контуров управления сложным робототехническим комплексом является разрабатываемый в [103] подход на основе применения идей когнитивной графики для описания и прогнозирования развития динамических сцен экстремальных ситуаций. Такой подход позволяет формировать базу знаний нечеткого интеллектуального регулятора и планировать маршруты движения автономного мобильного робота в экстремальных ситуациях. В [104] описаны структуры мобильных робототехнических промышленных комплексов (с дистанционным управлением на нечеткой логике) с роботом вертикального перемещения: для очистки горизонтальных (включая потолки) и вертикальных поверхностей; для резки металлических поверхностей и других технологических операций [105]. Результаты моделирования ориентации и передвижения автономного модуля (модель группового управления роботами) в условиях препятствий с использованием методов когнитивной графики [103,

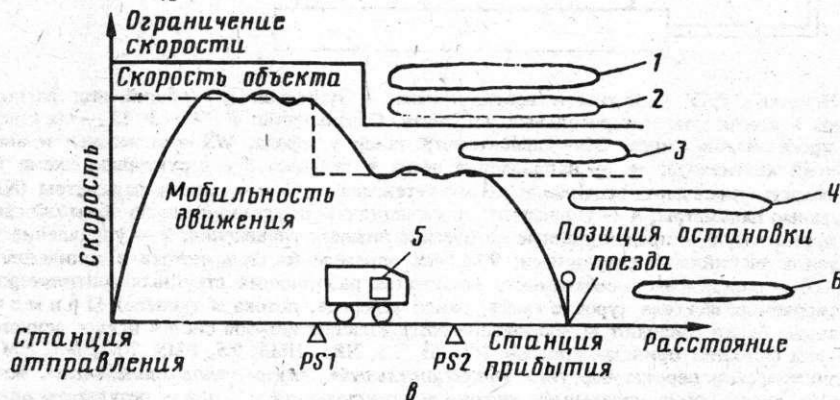
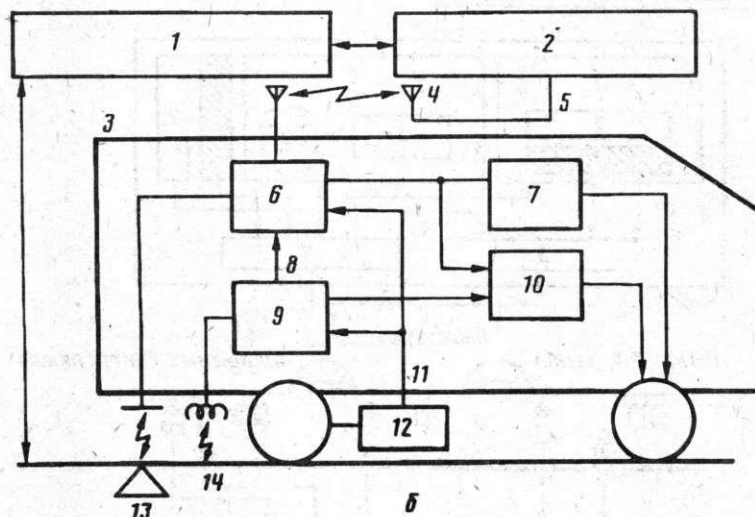
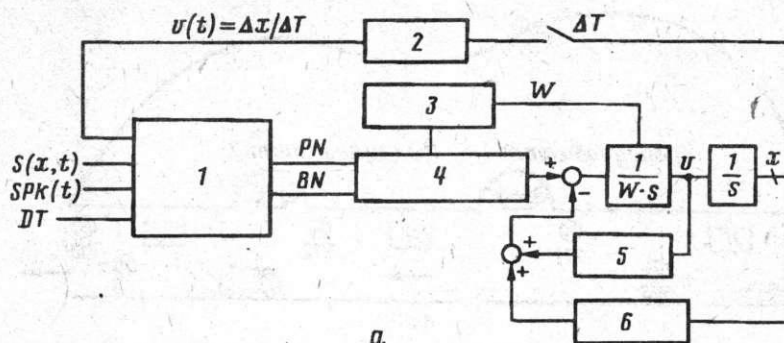


Рис. 11. Нечеткая САУ поездом метрополитена: а — нечеткий регулятор: 1 — нечеткий контроллер АТО; 2 — датчик скорости; 3 — устройство изменения нагрузки; 4 — контроллер силы тяги и торможения; 5 — устойчивость текущего движения; 6 — характеристика и изменение устойчивости в целом. Обозначения: t — время, v — скорость, x — расстояние, S — сигнал супервизорного управления тренажером, P — метка мощности, N — метка торможения, S_{pk} — сигнал выборки, T — время поезда; б — общий вид блока управления: 1 — автоматизированный тренажер (АТС); 2 — супервизорная система управления тренажером (АТС); 3, 4 — датчики тренажера и сигнализации; 5 — сигнал супервизорного управления; 6 — панель управления системы АТО; 7 — контроллер силы тяги; 8 — сигнал в кабину машиниста поезда; 9 — панель управления системы АТС; 10 — контроллер процесса торможения поезда; 11 — посылка импульса сигнала оценки расстояния; 12 — тахогенератор; 13 — метка положения; 14 — схема регистрации движения траектории; в — результаты моделирования движения поезда: PS1, PS2 — метки начала и конца позиции торможения; O — обозначение рабочих характеристик и показателей эффективности системы; 1 — время движения; 2 — расход энергии; 3 — надежность; 4 — комфортабельность; 5 — нечеткая система управления; 6 — зона останова.

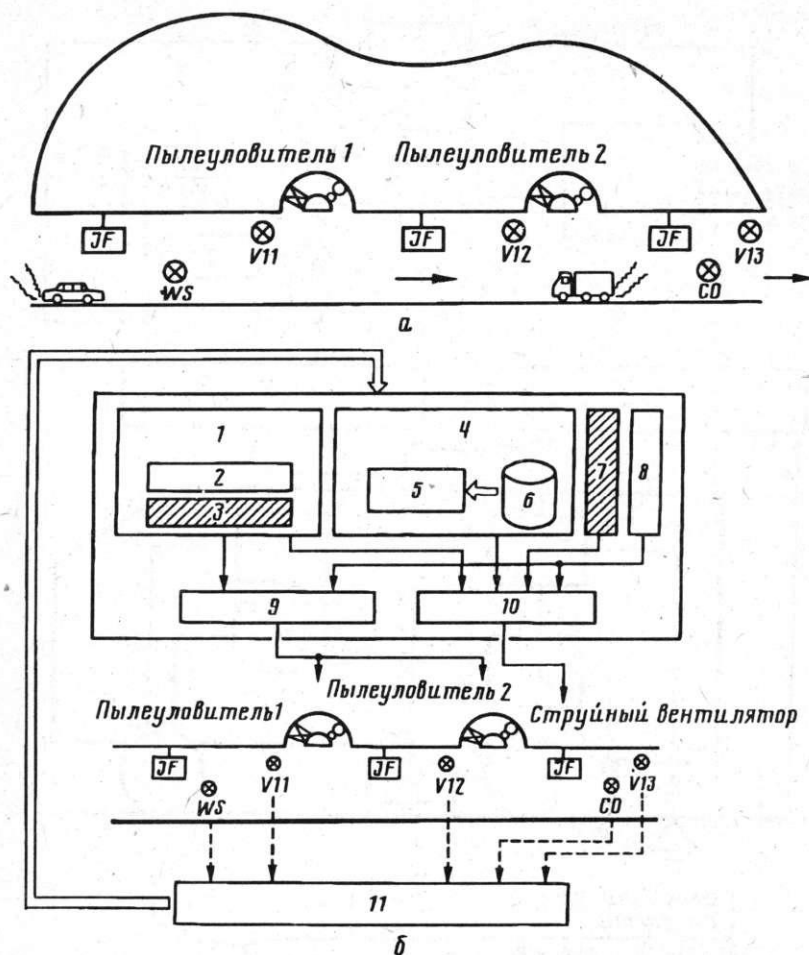
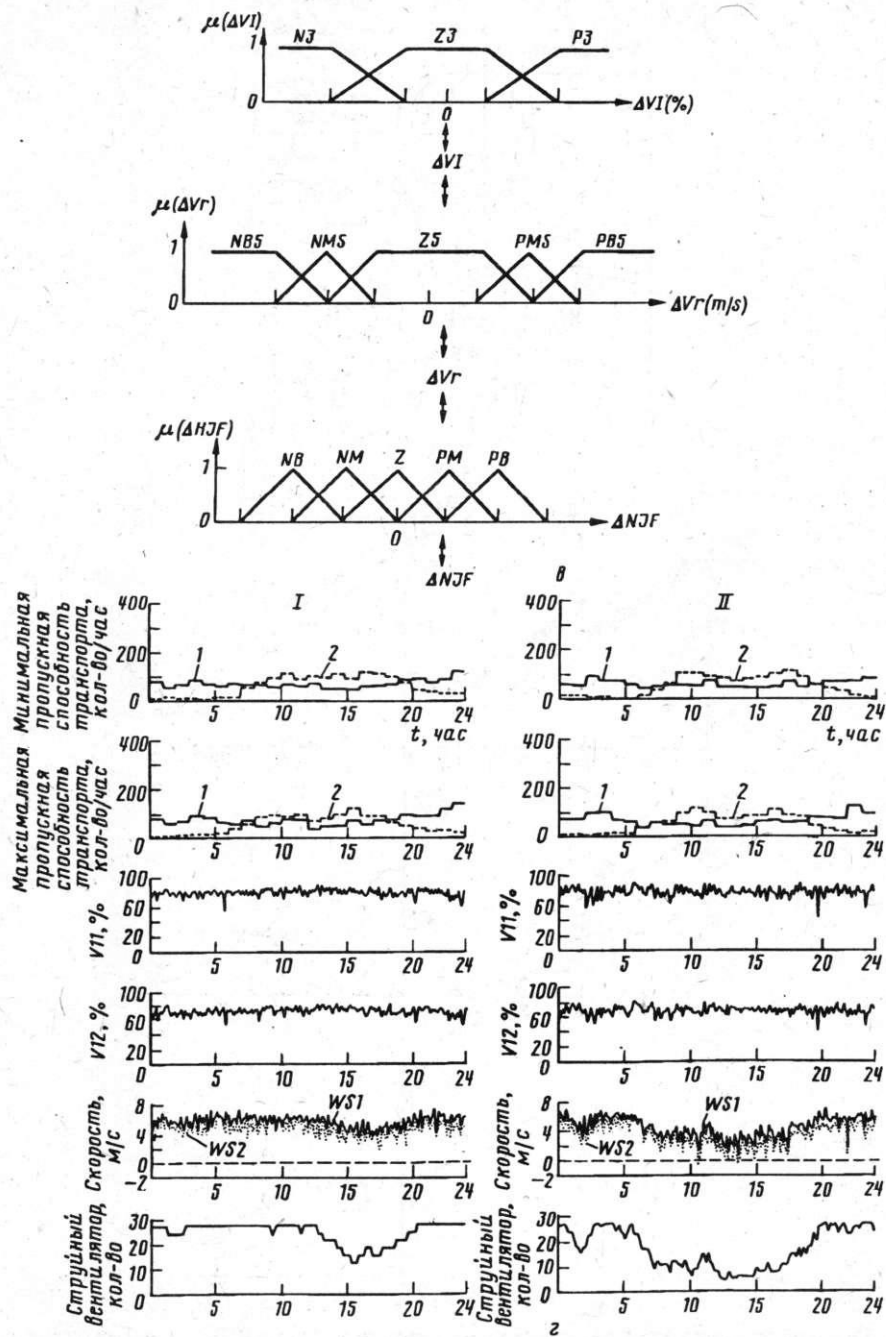


Рис. 12. Нечеткая САУ дорожными вентиляторами в туннелях: а — общий вид расположения вентиляторов и контрольно-измерительных устройств. Обозначения: V 11 — V 13 — счетчики коэффициента просачивания смога; CO — денситометр окиси углерода; WS — анемоскоп и анемометр; JF — струйный вентилятор; → — направление ветра в туннеле; б — структурная схема нечеткой САУ: 1 — область управления вентиляционными установками; 2 — числовые параметры (NJF); 3 — функциональные параметры; 4 — управление вентиляционными установками по обратной связи; 5 — нечеткое управление; 6 — продукционные логические правила управления; 7 — управление уровнем; 8 — управление аварийными ситуациями; 9 — блок определения силы потока и количества пылеуловителей; 10 — определение необходимого количества работающих струйных вентиляторов; 11 — датчики измеряемых величин (уровня смога, окиси углерода, потока в туннеле) **П р и м е ч а н и е:** заштрихованные блоки означают использование возможностей методов систем искусственного интеллекта; в — вид функций принадлежности: N3, Z3, P3, NB5, NM5, Z5, PM5, PB5, NB, NM, Z, PM, PB — лингвистические переменные типа «отрицательный», «яуль», «положительный», «очень отрицательный», «почти отрицательный», «почти положительный» и т. п. г — результаты применения нечеткой САУ: I — максимальная величина; 2 — минимальная величина; I — результаты съема контролируемых параметров без применения нечеткого управления; II — результаты съема контролируемых параметров с применением нечеткого алгоритма управления

106] и опытная эксплуатация показали высокую эффективность применения нечетких алгоритмов управления в дистанционно-управляемых мобильных робототехнических комплексах, используемых в экстремальных и аварийных ситуациях [104, 105].

Заключительные замечания. Опытная эксплуатация нечетких регуляторов и интеллектуальных САУ была осуществлена на многих дополнительных объектах управления различными зарубежными фирмами [107]:



- управление воздушным транспортом и посадка самолетов в аэропорту;
- контроль параметров реактора на АЭС, гидро- и электростанциях;
- управление шахтными комбайнами проходки;
- контроль очистки и жесткости воды в домашних условиях;
- автоматические электронные весы;
- контроль температуры и наличия суспензий в чистых комнатах для производства электронной аппаратуры и этилена;
- неразрушающий контроль шероховатости поверхности;

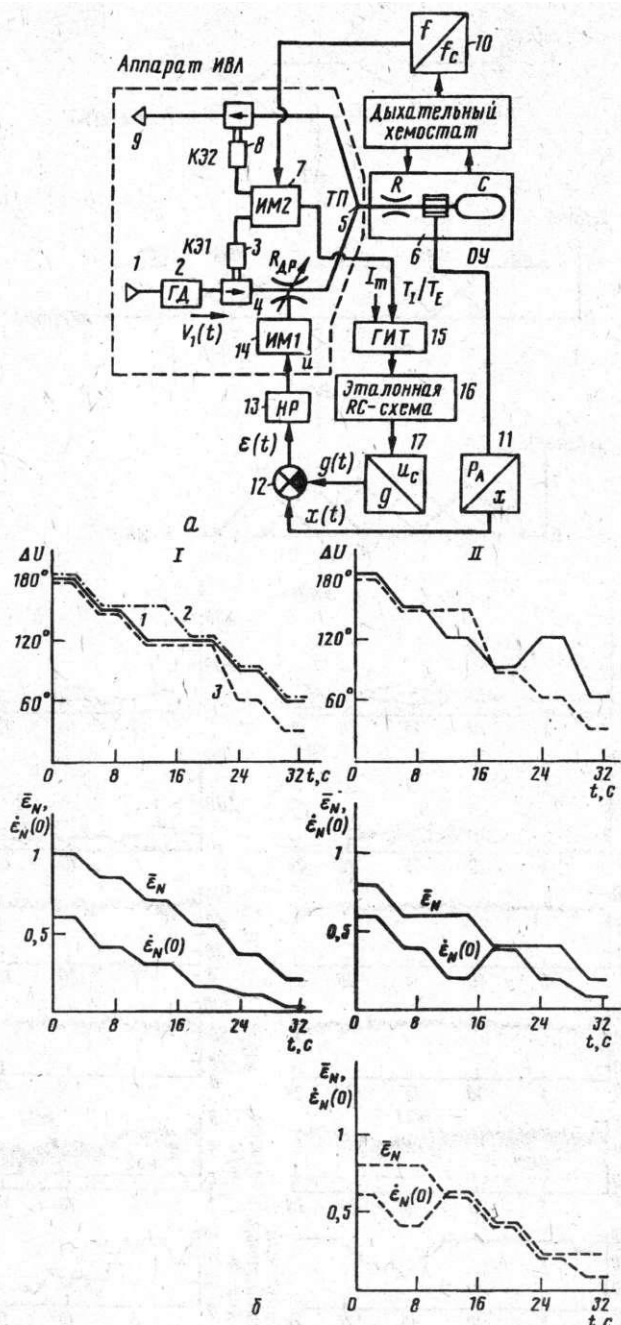


Рис. 13. Нечеткий регулятор аппарата искусственной вентиляции легких (ИВЛ): а — блок-схема дуального управления процессом ИВЛ: 1 — заборник воздуха; 2 — генератор давления; 3 — клапан воздуха (электромагнитный); 4 — регулирующий дроссель; 5 — тройник пациента; 6 — объект управления (легкие); 7 — исполнительный механизм клапанов и генератор импульсов тока (ГИТ); 8 — клапан выдоха (электромагнитный); 9 — отвод воздуха; 10 — преобразователь частоты сердечных сокращений (ЧСС) в частоту дыханий (ЧД); 11 — преобразователь P_A в регулируемую величину; 12 — сумматор; 13 — нечеткий регулятор; 14 — исполнительный механизм (шаговый двигатель); 15 — генератор импульсов тока (ГИТ); 16 — эталонная RC-схема; 17 — преобразователь u_c в задающее воздействие; б — результаты моделирования управления нечетким регулятором: I — оценка чувствительности управления к изменению параметров выбранной функции принадлежности (график 1 соответствует $K_1 = 2, K_2 = 0.3$; график 2 соответствует $K_1 = 2, K_2 = 1$; график 3 — $K_1 = 1.5, K_2 = 0.3$); II — оценка чувствительности управления к изменению траектории процесса (при $K_1 = 2, K_2 = 0.3$)

- неразрушающий контроль шероховатости поверхности;
- выбор и проектирование несущих опор для мостов;
- диагностика разрушений в машиностроительных конструкциях;
- распознавание речевых сигналов для устройств речевого ввода — вывода;
- фото- и видеокамеры и системы технического зрения для роботов;
- управление температурой газа и коксованием в печах отжига;
- контроль измерения кровяного и артериального давлений для автоматического ввода требуемых доз медикаментов;

— сочинение классических и джазовых музыкальных произведений и мн. др. Практическая реализация конкретных нечетких регуляторов и интеллектуальных САУ дала ощутимый экономический эффект [2, 3, 25—29], существенно обогатила и стимулировала дальнейшие теоретические исследования в области разработки нечетких систем управления, диагностики и контроля сложных динамических систем.

Разнообразие разработанных методов формирования баз знаний и моделей нечетких интеллектуальных промышленных регуляторов и САУ приводят к необходимости создания методологии и теоретических основ анализа, синтеза и проектирования структур подобных интеллектуальных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красовский А. А. Проблемы физической теории управления//А и Т. 1990. N 11.
2. Ульянов С. В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных систем управления: теоретические и прикладные аспекты//Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1991. N 3.
3. Nishikawa T. Fuzzy theory: The science of human intuition//Jap. Comput. Quart. 1989. N 79.
4. Schwartz T. J. Fuzzy systems come life in Japan: While there is only a glint in the American eye//IEEE Expert. 1990. V. 5. N 1.
5. A fuzzy era is on its way//Industria. 1989. V. 19. N. 7.
6. Yasunobu S. The trend of laboratory for International Fuzzy Engineering Research (LIFE)//J. Soc. Instrum. Contr. Eng. 1991. V. 30. N 2; Fuzzy logic prevails in Japan's research effort//Signal (USA). 1990. V. 44. N. 11.
7. Kahaner D. K. Advances in fuzzy theory and application//IEEE Micro. 1991. V. 11. N. 4.
8. Rothenberg S. I. Overview of fuzzy systems in Japan//Spang Robinson Rept. Intell. Syst. 1992. V. 8. N. 2.
9. Ульянов С. В. Научно-организационные и коммерческие аспекты разработки промышленных нечетких регуляторов и интеллектуальных САУ//Новости искусств. интеллекта. 1992. N 2.
10. Тарасов В. Б. Инструментальные средства разработки нечетких интеллектуальных систем//Новости искусств. интеллекта. 1991. N 3.
11. Meier R. Fuzzy logic: Das grosse W//Precision. 1992. V. 13. N 3.
12. Mukaidono M. Recent topics of fuzzy control from a viewpoint of application//Electric. Eng. Mag. (OHM). 1991. V. 78. N 10.
13. Robinson G. M. Fuzzy logic makes quesswork of computer control: Microproccers mimic human reasoning to create «smart» devices//Dec. News. 1991. V. 47. N 22.
14. Sugeno M. Fuzzy control. Nikkan Industry Newspaper Comp. Tokyo, 1988.
15. Terano T., Asai K., Sugeno M. Applied fuzzy systems. OHM Comp. Tokyo, 1989.
16. Hirota K. Fuzzy control and intelligent robot. McGraw-Hill, Japan, 1985.
17. Петров Б. Н., Уланов Г. М., Ульянов С. В. Теория моделей в процессах управления. М.: Наука, 1978.
18. Аверкин А. Н., Батыришин И. З., Блишун А. Ф. и др. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986.
19. Каинов В. Х., Селюгин А. А., Дубровский С. А. Методы обработки данных в системах с нечеткой информацией. Фрунзе: Илим, 1988.
20. Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990.
21. Алиев Р. А., Абдикеев Н. М., Шахназаров М. М. Производственные системы с искусственным интеллектом. М.: Радио и связь, 1990.
22. Малышев Н. Г., Берштейн Л. С., Боженюк А. В. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. М.: Энергоатомиздат. 1991.
23. Алиев Р. А., Церковный А. Э., Мамедова Г. А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат, 1991.
24. Алиев Р. А., Захарова Э. Г., Ульянов С. В. Нечеткие модели управления динамическими системами//Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибернетика. М.: ВИНТИ АН СССР. 1990. Т. 29.
25. Алиев Р. А., Захарова Э. Г., Ульянов С. В. Нечеткие регуляторы и интеллектуальные про-

- мышленные системы управления//Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибернетика. М.: ВИНТИ АН СССР. 1991. Т. 32.
26. Lee C. C. Fuzzy logic control systems: Fuzzy logic controller//IEEE Trans. Syst. Man and Cybern. 1990. V. SMC-20. N 2.
 27. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller//Int. J. Man Mach. Studies. 1975. V. 7. N 1.
 28. Larsen P. M. Industrial application of fuzzy logic control//Int. J. Man Mach. Studies. 1980. V. 12. N 1.
 29. Umbers J. G., King P. J. An analysis of human decision-making in cement kiln control and the implications for automation//Int. J. Mach. Studies. 1980. V. 12. N 1.
 30. First medical application of fuzzy theory//J. Comp. Quarterly. 1989. N 77.
 31. 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.
 32. Amirova E. K., Efimov V. A., Uljanov S. V. et al. Expert system for selecting lower-extremity (thigh) prostheses and diagnosis of the quality of artificial replacement//Biomed. Eng. 1991. V. 25. N 3.
 33. Аморова Э. К., Ефимов В. А., Ульянов С. В. и др. Экспертная система выбора протезов нижних конечностей (бедр) и диагностики качества протезирования//Мед. техника. 1991. N 6.
 34. Fuzzy control and introduction to home appliances//Techno Jap. 1991. V. 24. N 9.
 35. Fuzzy logic: A key technology for future competitiveness. Office of Comput. and Business Equipm., 1992.
 36. Litke H. D. Anwendungsgebiete und Entwicklungsstand der Fuzzy Logic: Logik der Grauwerte//NET. 1991. V. 45. N 11.
 37. Dambrot S. M., Swinbanks D. Fuzzy computing felt to be the next step in Tokyo//Nature. 1989. V. 337. N 6204.
 38. Williams T. «Fuzzy» logic processor speeds embedded AI control applications//Comp. Dec. 1989. V. 28. N 9.
 39. Armstrong L., Gross N. Why «fuzzy logic» beats black-or-white thinking//Bus Week. 1990. N 3160.
 40. Colin R. That fuzzy feeling: Mapping the future of fuzzy systems//Datamation. 1989. V. 35. N 14.
 41. Acar L., Ozguner U. Design of knowledge-rich hierarchical controllers for large functional systems//IEEE Trans. Syst., Man and Cybern. 1990. V. 20. N 4.
 42. Shin K. G., Gui X. Design of knowledge-based controller for intelligent control systems//IEEE Trans. Syst., Man and Cybern. 1991. V. 21. N 2.
 43. Tzafestas S. G. Artificial intelligence and expert systems techniques in control: an overview//Syst. Anal. Model. Simul. 1990. V. 7. N 3.
 44. Basu A. Expert systems in control engineering: A review of the perspective//Tete Tech. Rev. 1991. V. 8. N 3.
 45. Поспелов Д. А. (Ред.) Справочник по искусственному интеллекту М.: Радио и связь, 1990. Т. 2.
 46. Tang K. L., Mulholland R. J. Comparing fuzzy logic with classical controller designs//IEEE Trans. Syst., Man and Cybern. 1987. V. SMC-17. N 6.
 47. Tzafestas S., Papanikolopoulos N. P. Incremental fuzzy expert PID control//IEEE Trans. Industr. Electr. 1990. V. 37. N 5.
 48. Buckley J. J., Ying H. Expert fuzzy controller//Fuzzy Sets and Systems. 1991. V. 44. N 3.
 49. Batur C., Kasparin V. Model based fuzzy control//Math. and Comput. Modell. 1991. V. 15. N 12.
 50. Gupta M. M., Qi J. Design of fuzzy logic controllers based on generalized T-operators//Fuzzy Sets and Systems. 1991. V. 40. N 3.
 51. Buckley J. J., Ying H. Fuzzy controller theory: Limit theory for linear fuzzy control rules//Automatica. 1989. V. 25. N 3.
 52. Buckley J. J. Fuzzy controller: Further limit theorems for linear control rules//Fuzzy Sets and Systems. 1990. V. 36. N 3.
 53. Hirota K., Ozawa K. The concept of fuzzy flip-flop//IEEE Trans. Syst., Man and Cybern. 1989. V. 19. N 5.
 54. Hirota K., Ozawa K. Fuzzy flip-flop and fuzzy register//Fuzzy Sets and Systems. 1989. V. 32. N 2.
 55. Koszy L. T., Hirota K., Ozawa K. Knowledge representation and accumulation by fuzzy flip-flops//Fuzzy Sets and Systems. 1991. V. 39.
 56. Gupta M. M., Qi J. Theory of T-norms and fuzzy inference methods//Fuzzy Sets and Systems. 1991. V. 40. N 3.
 57. Yamaguchi T., Tanabe M., Takagi T. Fuzzy associative memory applications to control//Artif. Neural Networks. North Holland: Amsterdam etc. 1991. V. 2.
 58. Togai M., Watanabe H. Expert system on a chip: an engine for real-time approximate reasoning//IEEE Expert. 1986. V. 1. N 1.
 59. Togai M., Watanabe H. A VLSI implementation of a fuzzy inference engine: toward an expert system on a chip//Inf. Sci. 1986. V. 38. N 2.
 60. Chiu S., Togai M. A fuzzy logic programming environment for real-time control//Inf. J. Approxim. Reason. 1988. V. 2. N 2.
 61. Togai M. The possibilities of fuzzy computer//Electron. Mag. 1990. V. 35. N 10.
 62. Trautzl G. Mit Fuzzy-Logik naher zur Natur?//Elektronik. 1991. V. 40. N 9.

63. Догу М. Обзор инструментальных средств на нечеткой логике//Дэнси Гидзюцу. 1991. Т. 33. N 1.
64. Beard P. Fuzzy logic: buzzword or breakthrough//AI Week. 1990. V. 7. N 19.
65. Yamakawa T. High-speed fuzzy controller hardware system: The mega-FIPS machine//Inf. Sci. 1988. V. 45. N 2.
66. Yamakawa T. Intrinsic fuzzy electronic circuits for sixth generation computer//Fuzzy Computing/Ed. by M. M. Gupta and T. Yamakawa. Amsterdam: Elsevier Sci Publ., 1988.
67. Yamakawa T. Stabilization of an inverted pendulum by a high-speed fuzzy logic controller hardware system//Fuzzy Sets and Systems. 1989. V. 32. N. 2.
68. Dote Y. Fuzzy and neural networks controller//IECON'90:16th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (Calif., Nov. 27—30. 1990). N. Y. 1990. V. 2.
69. Lin C. T., Lee C. S. G. Neural-network-based fuzzy logic control and decision system//IEEE Trans. Comput. 1991. V. 40. N 2.
70. Ying X., Zeng N. A controller implemented by recording the fuzzy rules by BP neural networks//Acta. Autom. Sin. 1991. V. 17. N 1.
71. Morisue M., Suzuki K. A proposal of Josephson ternary fuzzy processor//ISEC'89: Int. Superconduct. Electron. Conf. (Tokyo, June 12—13, 1989). Tokyo, 1989.
72. Recently publicized exemplar of neurocomputer and fuzzy computer development projects//J. Comp. Quarterly. 1989. N 79.
- 72a. Itoh O. Fuzzy controller for process control and its applications//Jeho Seri. 1989. V. 30. N 8.
73. Yamazaki T. A survey on general purpose fuzzy control systems//J. Soc. Instrum. and Contr. Eng. 1989. V. 28. N 11.
74. Исигуро С. Контроллер на нечеткой логике фирмы «Омрон»//Отомэсен. 1990. Т. 35. N 4.
75. Урасаки К. Виды и проектирование структур аппаратных средств на нечеткой логике//Дэнси Гидзюцу. 1991. Т. 33. N 1.
76. Nakajima C., Muranaka K., Shimada Y. Fuzzy control by MICREX-F500//Fuji Elect. 1990. V. 63. N 4.
77. Sakawa M., Hoshi K., Yubazaki N et all. Fuzzy workstation for designing virtual paging fuzzy chip//Technol. Repts. Iwate Univ. 1989. N 23.
78. Arikawa H. Fuzzy development station//Instrum. and Autom. 1989. V. 17. N 9.
79. Katayama R., Kalitani Y., Matsumoto K. et all. Development support system for products using fuzzy logic//Sanyo Techn. Rev. 1991. V. 23. N 2.
80. Кацурагава М. Библиотека программ FZY-LIB и редактор FZY-EDP с нечеткой логикой//Отомэсен. 1990. Т. 35. N 4.
81. Nakata R., Endo T., Ichii M. Shell system for fuzzy control//Tochiba Rev. 1988. V. 43. N 4.
82. Исиди М. Комплексная система проектирования нечетких систем управления IFCS//Отомэсен. 1990. Т. 35. N 4.
83. Савада Х., Такэзуги Я. Инструментальные средства проектирования нечетких систем управления//Кэйсо. 1989. Т. 32. N 8.
84. Dote Y., Bose B. K. Fuzzy CAD for variable structure PI(D) controller//IECON'89: 15th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (Philadelphia, Nov. 6—10, 1989). N. Y., 1989. V. 1.
85. Йокибэ Т. Система управления на нечеткой логике компании «Мэйдэн»//Отомэсен. 1990. Т. 35. N 4.
86. Такэзуги М., Морита И. Комплексная нечеткая система управления CENTUM-XL//Отомэсен. 1990. Т. 35. N 4.
87. Мори Р., Кикутани А. Комплексная нечеткая система контроля и управления распределенного типа TDCS 3000 LCN//Отомэсен. 1990. Т. 35. N 4.
88. Daley S., Gill K. F. The fuzzy logic controller: An alternative desing scheme?//Int. J. Computers Indust. 1985. V. 6. N 1.
89. Daley S., Gill K. F. Comparison of a fuzzy logic controller with a P + D control law//Trans. of the ASME. 1989. V. 111. N 2.
90. Yasunobu S., Miyamoto S. Automatic train operation system by predictive fuzzy control//Indust. Applicat. of Fuzzy Control/Ed. by M. Sugeno. Noth Holland: Elsevier Sci. Publ., 1985.
91. Yasunobu S. Automatic train operation system based on fuzzy reasoning//Automátion. 1989. V. 30. N 8.
92. Куниаки М. Применение нечеткой логики в системах автоматического управления поездами метрополитена и автономными подвижными средствами//Сэньи Кикай Гаккайси. 1990. Т. 43. N 7.
93. Isobe E., Yasunobu S. Advanced fuzzy control: Its application to subway system//Electr. Eng. Mag. (OHM). 1991. V. 78. N 10.
94. Миеси М., Йосино Н. Нечеткая система управления вентиляторами в дорожных туннелях//Отомэсен. 1990. Т. 35. N 4.
95. Тамура К., Мацусита Н. Применение нечеткой логики при управлении процессом вентиляции в дорожном туннеле//Мэйдэн Дзихо. 1991. N 217.
96. Ионоу И. П., Кантор П. С., Ульянов С. В. и др. Дуальное управление искусственной вентиляцией легких с использованием нечеткого регулятора в цепи обратной связи//Мед. техника. N 1.
97. Ионоу И. П., Кантор П. С., Ульянов С. В. Аппарат искусственной вентиляции легких//А. с. 1621930. 1989.
98. Vasiljeva O. I., Ionov I. P., Uljanov S. V. et all. Dual control of artificial ventilation of lungs (AVL) process using a fuzzy controller in the feedback circuit//Biomed. Eng. 1990. V. 23. N 1.

99. Белиловский М. А., Ульянов С. В. и др. Дуальное управление вспомогательными аппаратами по критерию частично замещаемого органа//Мед. техника. 1980. N 5.
100. Ульянов С. В. Модели квантово-релятивистских нечетких логик в интеллектуальных системах//Докл. 2 Всесоюзн. конф. «Искусственный интеллект-90». М.: ВЦ АН СССР. 1990. Т. 2.
101. Cook G. W. Distribution in fuzzy logic//Fuzzy Sets and Systems. 1986. V. 20. N 3.
102. Smets P., Magrez P. Implications in fuzzy logic// Int. J. Approxim. Reason. 1987. V. 1. N 4.
103. Литвинцева Л. В. Визуализация пространственных сцен по текстовым описаниям для интеллектуальных систем//Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1991. N 5.
104. Градецкий В. Г., Рачков М. Ю., Ульянов С. В. и др. Мобильные системы с роботами вертикального перемещения//Изв. АН СССР Техн. кибернетика. 1991. N 6.
105. Gradetsky V. G., Rachkov M. Y., Uljanov S. V., et all. Robots for cleaning and decontamination of building constructions//Proc. 8 th Int. Sump. Automat. and Robotics in Construction (ISARC). Fraunhofer Inst. Manuf. Eng. Autom., 1991. V. 1.
106. Литвинцева Л. В., Ульянов С. В. Планирование движения автономных роботов на основе когнитивной графики//Тез. докл. Всес. конф. «Интеллектуализация систем управления». Баку: АИУ, 1991.
107. Ульянов С. В. Нечеткие регуляторы и интеллектуальные системы управления в промышленности//Новости искусств. интеллекта. 1992. N 1.

Москва,
ВЦ РАН

Поступила в редакцию
25.V.1992