

НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Ульянов Сергей Викторович¹, Тятюшкина Ольга Юрьевна²,
Колбенко Екатерина Викторовна³

¹ Доктор физико-математических наук, профессор;

PronetLabs;

117403 Москва ул. Булатниковская, 20, стр. 3

e-mail: uyanovsv@mail.ru.

² Старший преподаватель;

ГОУ ВПО Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,

Институт системного анализа и управления;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19,

e-mail: tyatyushkina@mail.ru.

³ Старший преподаватель;

ГОУ ВПО Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,

Институт системного анализа и управления;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19,

e-mail: ekolbenko@uni-dubna.ru.

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.

Ключевые слова: нечеткие системы управления, интеллектуальная система автоматического управления, экспертная система, модель нечеткого регулятора, ПИД-регулятор.

FUZZY MODELS OF INTELLIGENT INDUSTRIAL CONTROLLERS AND CONTROL SYSTEM. DESIGN PROCEDURE

Uyanov Sergey¹, Tyatyushkina Olga², Kolbenko Ekaterina³

¹ Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;

PronetLabs;

117403, Moscow, Bulatnikovskaya str., 20-3;

e-mail: uyanovsv@mail.ru.

² Senior teacher;

Dubna International University of Nature, Society and Man,

Institute of system analysis and management;

141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;

e-mail: tyatyushkina@mail.ru.

³ Senior teacher;

Dubna International University of Nature, Society and Man,

Institute of system analysis and management;

141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;

e-mail: ekolbenko@uni-dubna.ru.

The problems of designing industrial controllers and control systems with various degrees of intelligence are discussed. The primitive nature of existing hardware and software support of knowledge-based control processes and methods of designing intelligent control systems is noted. The need to develop a special procedure for designing such control systems is emphasized. The principles of a design procedure for multilevel intelligent automatic control systems are proposed, The features of the design of control systems that are intelligent «in the large» and «in the small» are analyzed. Numerous examples of designed systems are presented.

Keywords: Fuzzy control systems, intelligent automatic control systems, fuzzy neural networks, fuzzy expert systems, FZUP-systems, PID-controller.

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] с последующей их лингвистической аппроксимацией [4].

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, 4]. Синтез разнообразных методов проектирования и эксплуатация разработанных коммерческих образцов нечетких регуляторов и САУ показали, что методология проектирования и средства программно-аппаратной поддержки подобных интеллектуальных систем находятся на начальной стадии развития.

При создании инженерных методов проектирования проблемно-ориентированных систем управления, основанных на знаниях (в общем случае, на основе нечетких экспертных систем как интеллектуальных «в большом» [4]), выяснилось, что с учетом особенностей условий применения разрабатываемые процессы проектирования требуют дополнительных исследований и специальных теоретических обоснований.

Данная статья 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, с соответствующей классификацией проблемно-ориентированных задач промышленной автоматизации; вопросы рационального построения баз знаний и эффективных аналитических моделей процессов управления, основанных на использовании знаний, согласно сформулированным в [4] 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 окружающей 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 [7]. Таким образом, задача выделения функций управления, реализуемых на самом нижнем подуровне исполнительного уровня [4], 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.

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

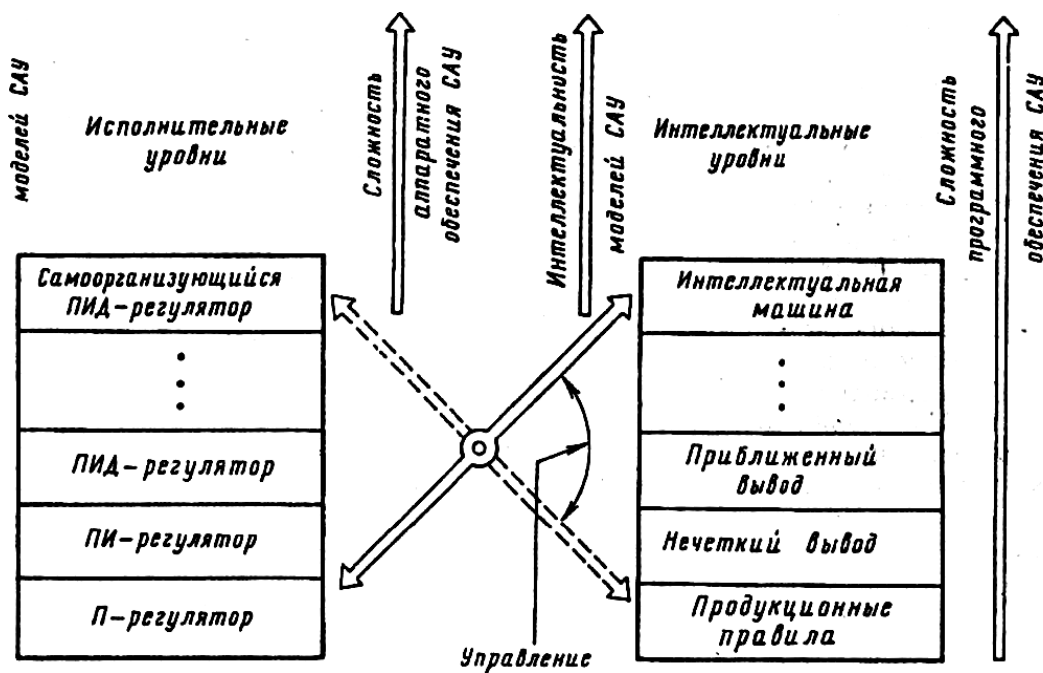


Рис. 1. К методологии проектирования структур САУ (на исполнительном и интеллектуальном уровнях)

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) [8] 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. Совместно с нечеткими алгоритмами идентификации и моделями нелинейной нечеткой регрессии 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 [4].

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 [8, 9]. В частности, модель нечеткой ассоциативной памяти на нейронной сети типа FAM (Fuzzy-Associative-Memory) [9] 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 [9]. В частности, особую роль данные методы приобретают в задачах идентификации [9], формирования процедур оценки чувствительности и полноты баз знаний, 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, 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 F N N в задачах управления сложными робототехническими системами отражено в [8].

О п р е д е л е н и е . 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 [4, 10-11]. Развитие микроэлектронной технологии и методологии организации вычислительного процесса позволило создать принципиально новый вид нечеткого процессора, 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 для реализации процессов управления на основе гибридного подхода нейро- и нечеткой технологий к процессам проектирования.

Развитие процессов проектирования интеллектуальных систем потребовало соответствующего программного обеспечения. Известны разработанные программные средства проектирования и поддержки нечетких контроллеров и САУ с различной проблемной ориентацией [4].

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 и их взаимосвязь с процессами управления [12], 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.

Анализ качественных особенностей динамического поведения объектов управления и предельных возможностей информационных процессов управления [3] 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.

Дополнительный анализ прикладных методов исследования и имитационного моделирования систем, основанных на знаниях, подтвердил [12] 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 производственных правил в базе знаний и т. п. [13]). 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 [12] и установления адекватности моделей реальному объекту в задачах идентификации процессов управления.

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 [12]. Такие регуляторы в частном случае (при использовании только одной нечеткой нейронной сети типа FNN на основе FAM) переходят в класс нечетких контроллеров и САУ. 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. 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, рассматривается линейная система с запаздыванием с передаточной функцией следующего вида: $\Phi(s) = \frac{0,53 \exp(-s)}{(33,5s+1)}$. 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 пара-

метров ПИД-регулятора осуществлялся по критерию минимума полной среднеквадратичной ошибки $e^2(t)$ типа

$$Q(n) = \min \sum_{i=1}^m e^2(i)T,$$

используя методику в виде выбора закона управления

$$u(n) = u(n-1) + k_i e(n) + k_j \Delta e(n).$$

Параметры k_i и k_j определялись из критерия минимизации функционала стоимости типа

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

где P – функционал стоимости, Δ_1 – приращение по k_i , Δ_2 – приращение по k_j .

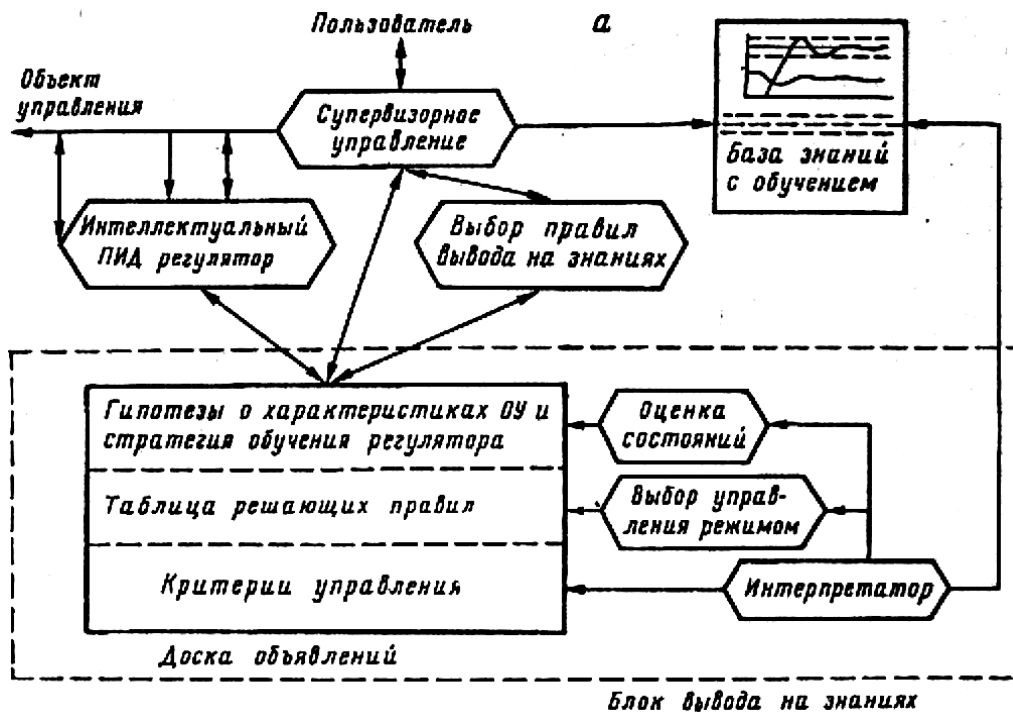


Рис. 2. Моделирование динамического поведения управляемого объекта: а – блок-схема ЭС для моделирования процессов управления в реальном времени

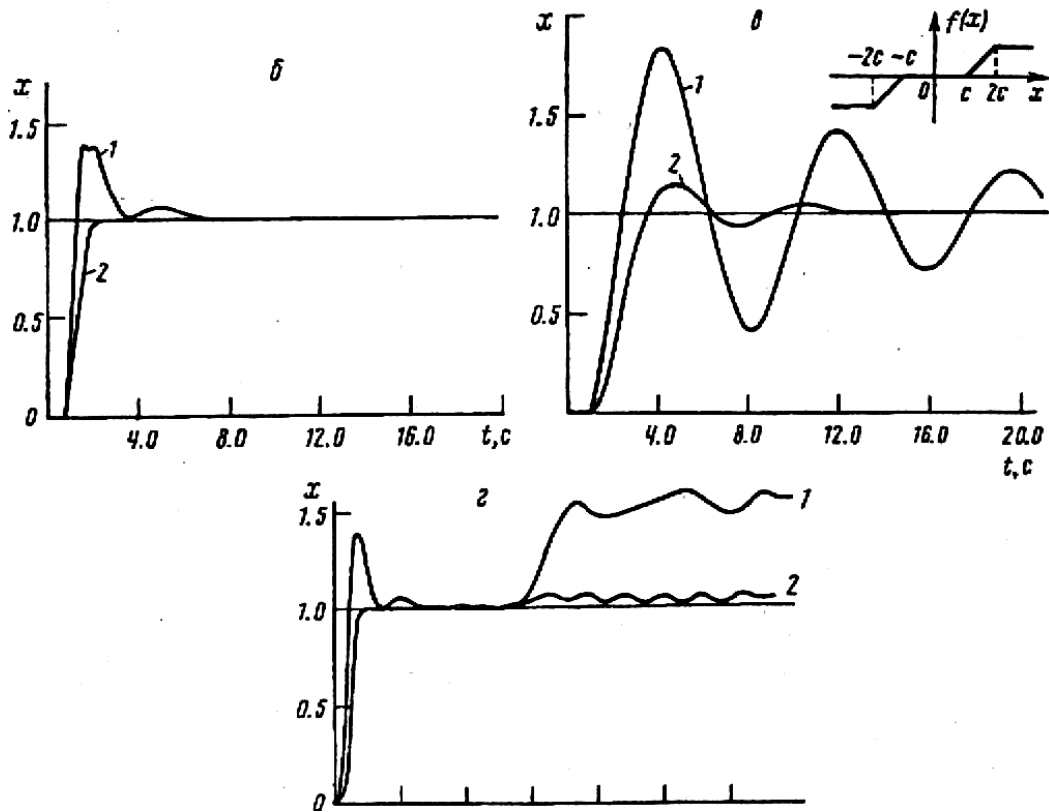


Рис. 2. Моделирование динамического поведения управляемого объекта (1 – ПИД-регулятор; 2 – интеллектуальный регулятор с ЭС): б – переходные процессы линейного ОУ с задержкой при ступенчатом воздействии; в – переходные процессы нелинейного ОУ; г – переходные процессы линейного ОУ при случайных воздействиях

Типовая структурная схема моделирования динамического поведения объекта управления (ОУ) на основе использования активных ЭС представлена на рис. 2, а. База данных данной ЭС содержит сведения об экспериментальных данных измерений реальных характеристик динамического поведения исследуемого ОУ (таких как 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, с), результаты имитационного моделирования и т.д. Такие активные ЭС для процессов управления относятся к ЭС второго поколения с глубинным представлением знаний, структура и функции которых описаны в [14]. 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. Данные правила вывода и алгоритмы управления имеют следующий вид:

R1: если $(e_i > e_0)$, то $u_i = u_0$;

R2: если $(e_1 < e_i \leq e_0)$, то $u_i = k_i u_0$

R3: если $(-e_1 < e_i < -e_2)$, то $u_i = k_5 e_i(n) + k_6 \Delta e_i(n)$;

R4: если $(e_1 < -e_i)$, то $u_i = k_i u_0$;

$$R5: \text{если } (e_2 < e_i \leq e_1) \text{ и } \left| \dot{e}_i \right| \leq G_1, \text{ то } u_i = k_3 e_i(n) + k_4 \sum_{i=1}^j e_i(n); \quad (2.1)$$

$$R6: \text{если } (e_2 < e_i \leq e_1) \text{ и } \left| \dot{e}_i \right| > G_1, \text{ то } u_i = k_2 e_i(n);$$

$$R7: \text{если } (e_3 < e_i \leq e_2) \text{ и } \left| \dot{e}_i \right| \leq G_2, \text{ то } u_i = k_5 e_i(n) + k_6 \Delta e_i(n);$$

$$R8: \text{если } (e_3 < e_i \leq e_2) \text{ и } G_2 < \left| \dot{e}_i \right| \leq G_3, \text{ то } u_i = k_5 e_i(n) + k_6 \Delta e_i(n);$$

$$R9: \text{если } (e_3 < e_i \leq e_2) \text{ и } \left| \dot{e}_i \right| > G_3, \text{ то } u_i = k_5 e_i(n) + k_6 \Delta e_i(n);$$

$$R10: \text{если } (|e_i| \leq e_3) \text{ и } (e_i \cdot \dot{e}_i > 0 \text{ и } \left| \dot{e}_i \right| \leq G), \text{ то } u_i(n) = u_i(n-1) + k_7 e_i(n) + k_8 \Delta e_i(n);$$

$$R11: \text{если } (|e_i| \leq e_3) \text{ и } (e_i \cdot \dot{e}_i > 0 \text{ и } \left| \dot{e}_i \right| > G), \text{ то } u_i(n) = u_i(n-1) + k_7 e_i(n) + k_8 \Delta e_i(n);$$

$$R12: \text{если } (|e_i| \leq e_3) \text{ и } (e_i \cdot \dot{e}_i > 0 \text{ и } e_i \cdot \dot{e}_{i-1} > 0), \text{ то } u_i(n) = u_i(n-1) + k_7 e_i(n) + k_8 \Delta e_i(n);$$

$$R13: \text{если } (|e_i| \leq e_3) \text{ и } (e_i \cdot \dot{e}_i > 0 \text{ и } e_i \cdot \dot{e}_{i-1} < 0), \text{ то } u_i(n) = u_i(n-1) + k_7 e_i(n) + k_8 \Delta e_i(n);$$

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 «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 в 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.

ствии (см. рис. 2, з). Приведенный пример наглядно отражает роль наличия базы знаний и механизма логического вывода в интеллектуальных регуляторах, проектируемых по сформулированным принципам.

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.

П р и м е р 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:

$$\text{если } d|e|dt \geq 0, \text{ то } u(n) = Ke + u_1(n-1), \Delta u_1(n) = \frac{1}{T_I} \int e(n)dt, \quad (2.3)$$

$$\text{если } d|e|dt < 0 \text{ и } d\dot{|e|}dt > 0, \text{ то } u(n) = T_d \cdot de/dt + u_1(n), \quad (2.4)$$

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

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.

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).

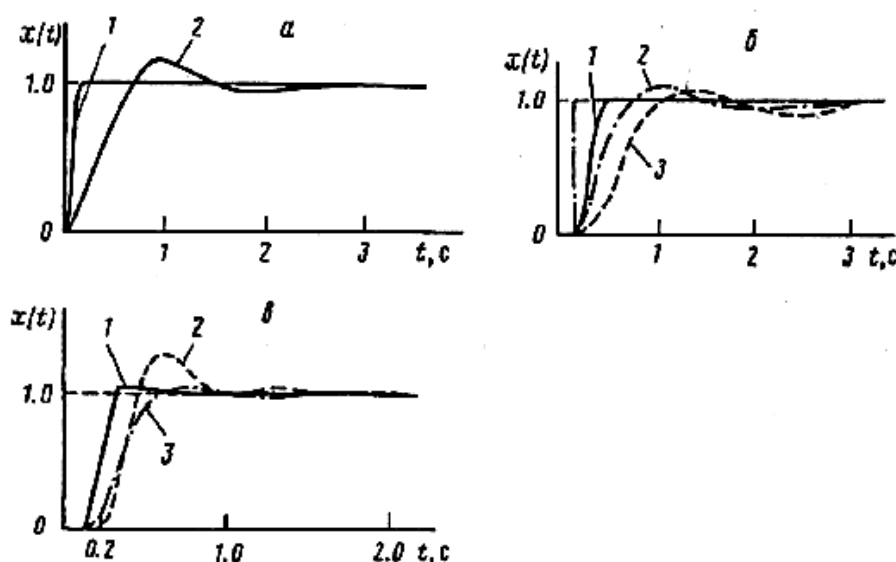


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования переходных процессов: а – переходные процессы в ОУ для интеллектуального (1) и логического (2) ПИД-регуляторов с передаточной функцией ОУ вида $\Phi = \exp(-0,05s)/(1,5s + 1)^2$; б – переходные процессы в ОУ для интеллектуального (1), логического (2) и традиционного (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 – $\Phi = \exp(-0,15s)/(0,4s + 1)$

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 [12, 15]. В результате разработано достаточно большое количество моделей нечетких ЭС второго поколения [14], широко используемых в различных проблемно-ориентированных областях: в робототехнике [4]; нечетких системах управления и нечетких контроллерах для атомных регуляторов; человеко-машинных системах; в иерархических нечетких системах супервизорного управления сложными динамическими объектами (например, вращающимися печами для обжига и сушки, холодильными промышленными установками и мн. др.); в системах управления вспомогательными аппаратами, частично замещающими органы при утраченных функциях целостного организма (типа искусственной вентиляции легких); для регулирования, среднего кровяного давления в аппаратах искусственного кровообращения и искусственной почки.

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 дополнительные особенности формирования этапов проектирования интеллектуальных регуляторов и САУ на базе нечетких ЭС, нашедших частично свое отражение в моделях нечетких САПР [17]. 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 при этом функционируют в аварийных ситуациях (типа дезактивации рабочих помещений АЭС, ту-

шения 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. 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» [4]. 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. Первый нечеткий контроллер относится к классу интеллектуальных «в малом», а второй нечеткий контроллер – к классу интеллектуальных «в большом».

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 [18] 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. [4]. 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 $\Phi(x) = 1/(1 + T_1s)(1 + T_2s)$. 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, показывающие эффективность применения интеллектуального ПИД-регулятора.

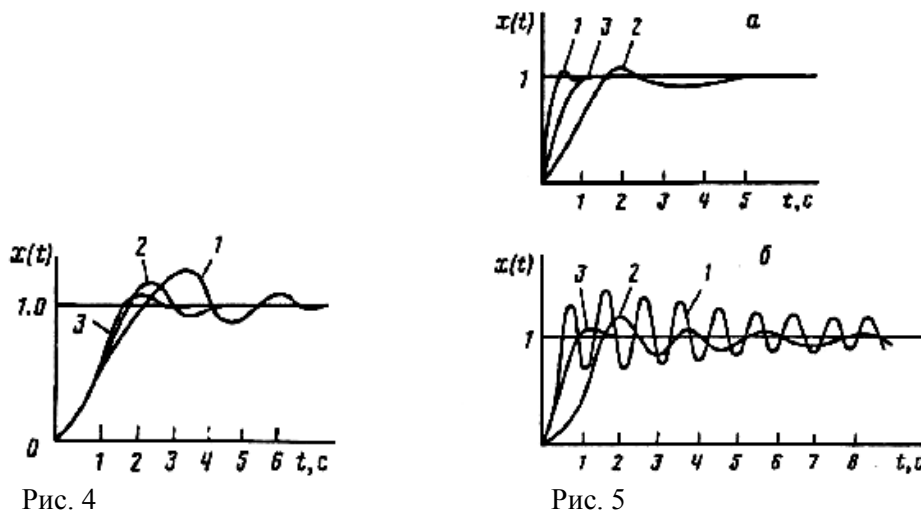


Рис. 4

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.

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 ПИ-регулятор и интеллектуальный регулятор из примера 1. На рис. 5 приведены результаты моделирования 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 [16].

В целом приведенные в примерах 1-4 результаты моделирования показывают, что интеллектуальные регуляторы обладают развитыми функциональными возможностями, большей степенью адаптации и робастности [4]. 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 в ОУ и преодоление сложностей исследования с помощью нечетких моделей регуляторов показано во многих работах [19]. 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*).

Процесс 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 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, представляющей самостоятельный интерес для интеллектуальных систем управления работой человека-оператора.

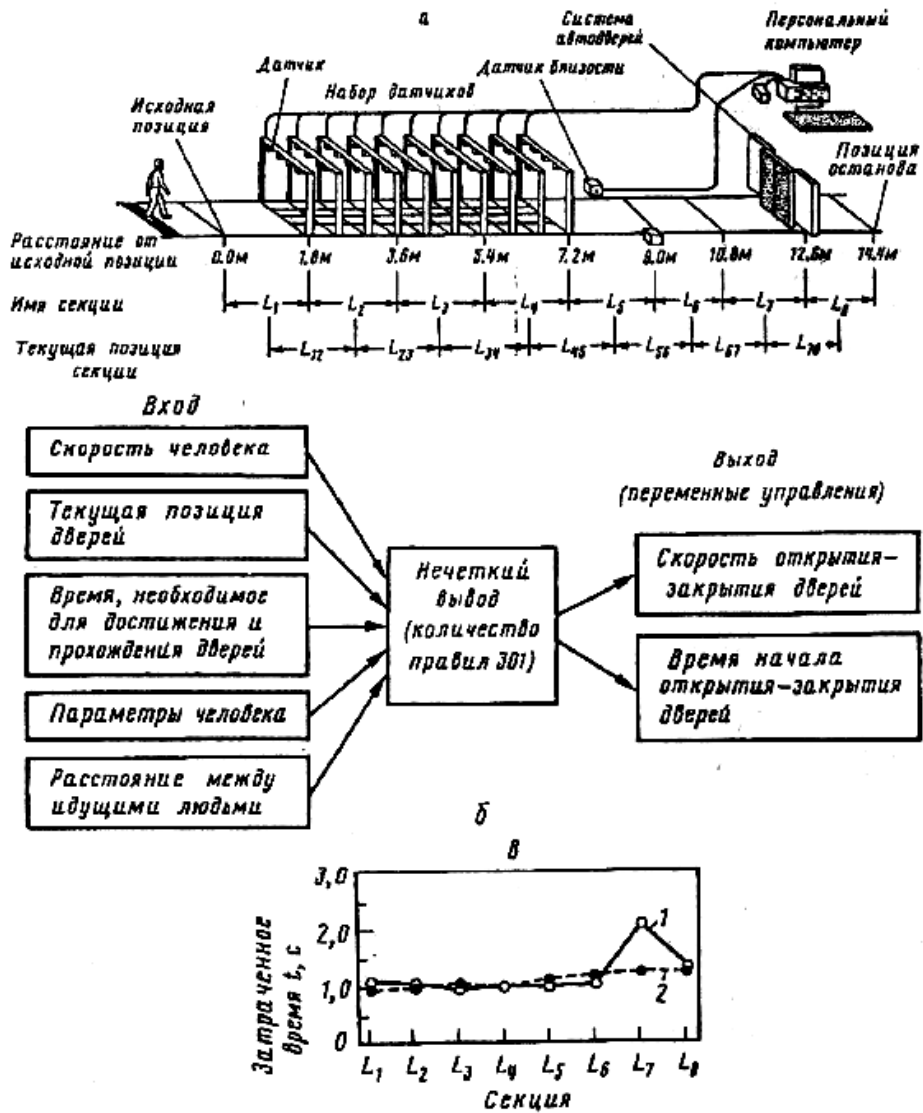


Рис. 6. Нечеткая система управления автоматическим закрыванием и открыванием дверей: а – общая схема системы; б – структура блока нечеткого логического вывода; в – экспериментальные данные результатов измерения затраченного времени на прохождение пешеходом каждой из секций L_i ($i = 1, 2, \dots, 8$):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

Пример 6. Модель перевернутого маятника представлена на рис. 7.

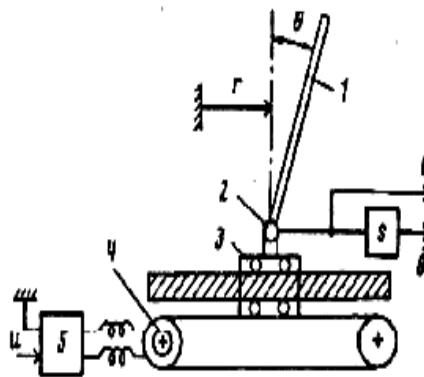


Рис. 7. Экспериментальная схема проверки устойчивости перевернутого маятника: 1 – маятник, 2 – потенциометр, 3 – движущая тележка, 4 – двигатель, 5 – усилитель мощности

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. Аналогичный подход использовался и при решении задачи об устойчивости перевернутого двойного маятника. Уравнение движения перевернутого маятника под действием управляющей силы u хорошо известно из аналитической механики и имеет вид:

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

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

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.

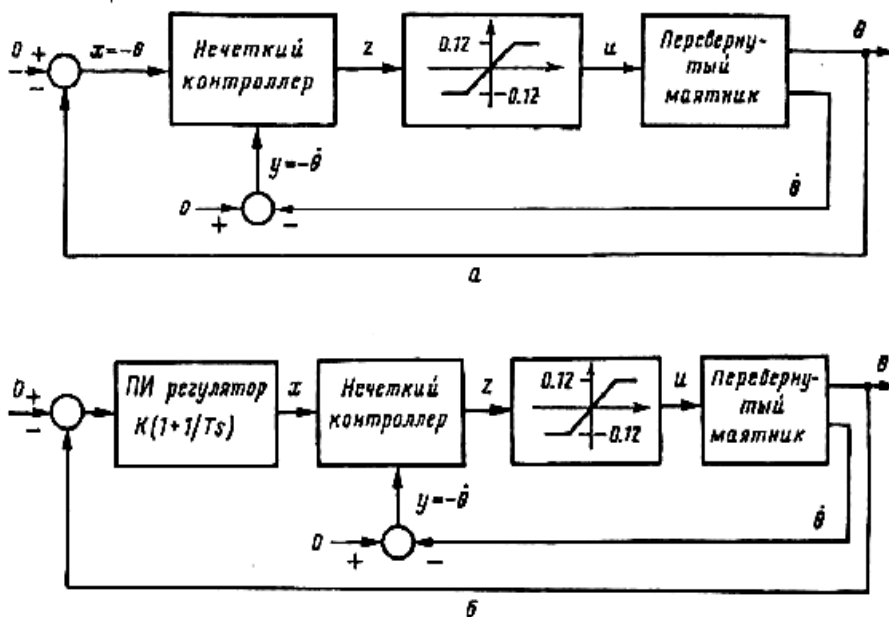


Рис. 8. Структурные схемы управления устойчивым положением перевернутого маятника: а – схема с нечетким контроллером; б – комбинированная схема управления (ПИ-регулятор и нечеткий контроллер)

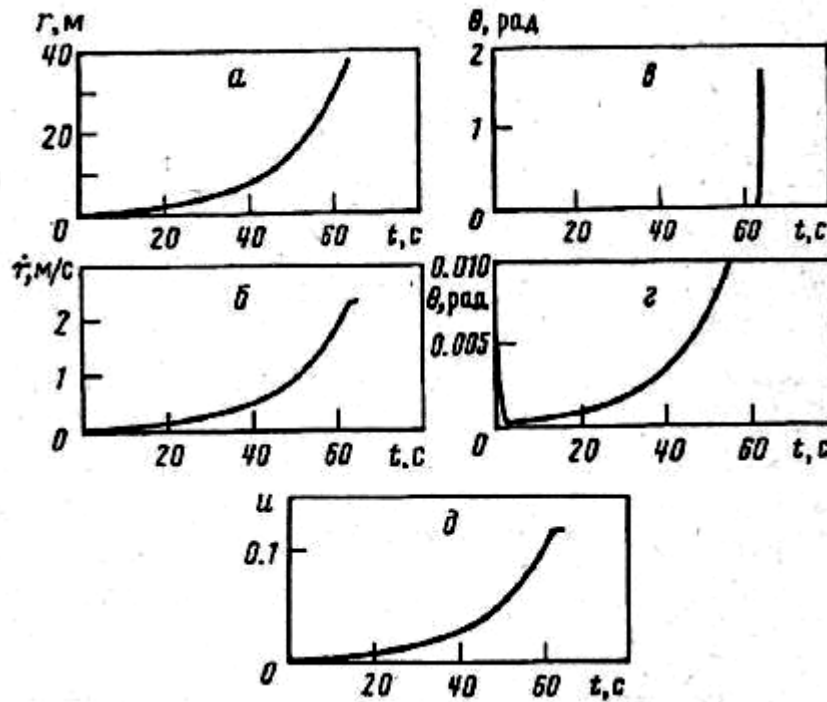


Рис. 9. Результаты имитационного моделирования устойчивости перевернутого маятника на схеме рис. 8, а; а – положение движущейся тележки; б – скорость движения тележки; в – угол положения перевернутого маятника; г – увеличенное изображение рис. 9, в; д – изменение сигнала управления

На рис. 9 приведены результаты моделирования динамического поведения перевернутого маятника при начальном условии $\theta(0) = 0,01$ рад. Из рис. 9 (в, 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.

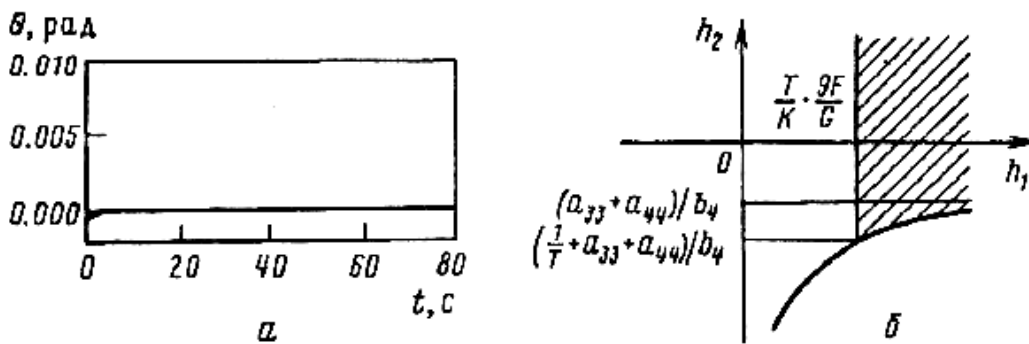


Рис. 10. Результаты имитационного моделирования устойчивости перевернутого маятника по схеме рис. 8, б: а – угол положения перевернутого маятника, б – области устойчивости в пространстве параметров нечеткого регулятора и ПИ-регулятора

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: $K = 5$, $T = 2,5$. Анализ условий устойчивости движения перевернутого маятника можно получить из линеаризованной системы (4.1) вида

$$(v = [r, \theta, \dot{r}, \dot{\theta}]^T) \quad \dot{v} = Av + bu, \text{ где}$$

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

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:

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

где

$$Q_{11} = -a_{33} - a_{44};$$

$$Q_{12} = b_4;$$

$$Q_{21} = a_{33}a_{44} - a_{42} - a_{34}a_{43};$$

$$Q_{22} = b_4; \quad Q_{31} = -a_{43}a_{32} + a_{33}a_{42}.$$

Из (4.2) следует, что необходимым условием устойчивости является наличие отрицательного значения свободного члена

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

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

$$s^2[s^3 + (Q_{11} + Q_{12}h_2)s^2 + (Q_{21} + kb_4h_1)s + Q_{31} + \frac{Kb_4h_1}{T}] = 0, \tag{4.3}$$

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

нейных неголономных связей), а удержание в устойчивом вертикальном положении маятника осуществляется организацией линейной обратной связи на традиционных моделях регулятора.

Более широкое исследование показало плодотворность гибридного подхода использования нечеткого регулятора совместно с ПИД-регулятором. С другой стороны, устойчивое состояние перевернутого маятника можно получить без применения ПИД-регулятора за счет усложнения алгоритма управления нечеткого регулятора с применением адаптации или обучения на нейронной сети. На рис. 11 показаны результаты имитационного моделирования устойчивости перевернутого маятника с адаптивным нечетким регулятором.

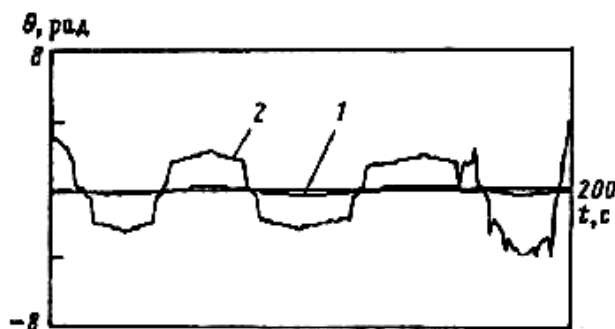


Рис. 11. Результаты моделирования устойчивости перевернутого маятника при использовании адаптивного нечеткого регулятора в контуре управления: 1 – выходной сигнал (угол отклонения маятника); 2 – выходной сигнал управления нечеткого адаптивного контроллера

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, 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), формирова́тель базы знаний, формирова́тель 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. И., Уланов Г. М., Ульянов С. В. Теория моделей в процессах управления: Термодинамические и информационные аспекты. – М.: Наука, 1978.
4. Захаров В. Н., Ульянов С. В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. Ч. I, II // Изв. АН. Техн. Кибернетика, 1992. – № 5; 1993. – № 1.
5. Mamdani E. H., Sembi B. S. Process control using fuzzy logic 11 Fuzzy sets: Theory and Applications to Policy Analysis and Information Systems / Wang P. P. and Chang S. K. (Eds). Plenum Press, N. Y., 1980.
6. Sugeno M., Kang G. T. Fuzzy modelling and control of multilayer incinerator 11 Fuzzy Sets and Systems, 1986. – Vol. 18. – № 3; 1988. – Vol. 25. – № 2.
7. Ульянов С. В. Нечеткие модели логических регуляторов в интеллектуальных системах управления мобильными робототехническими комплексами // Обработка динамической информации в интеллектуальных системах. – М.: ИФТП РАН, 1992.
8. Werbos J. Neurocontrol and fuzzy logic: connections and designs // IJCNN-91: Int. Conf. Neur. Networks. (Wash. July 8-12, 1991). N. Y., 1991.
9. Kosko B. Neural networks and fuzzy systems: A dynamical system approach to machine intelligence. Prentice Hall, 1992.
10. 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.
11. 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.
12. Захаров В. Н., Ульянов С. В. Принципы построения моделей интеллектуальных машин и когнитивных систем управления // Интеллектуальные системы обработки динамической информации. – М.: ИФТП, 1993.
13. Zhou Q. The robustness of an intelligent controller and its performance // Int. Conf. Contr. / IEEE Conf. Publ., 1985.
14. 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.
15. Zadeh L. A. Knowledge representation in fuzzy logic//IEEE Trans, on Knowledge and Data Eng, 1989. – Vol. 1. – № 1.
16. Tzafestas S., Papanikolopoulos N. P. Incremental fuzzy expert PID control // IEEE Trans. Ind. Electr., 1990. – Vol. 37. – № 5.
17. Малышев Н. Г., Берштейн Л. С., Боженюк А. В. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. М.: Энергоатомиздат, 1991.
18. 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. – Vol. 36. – № 2; Fuzzy control theory: A nonlinear case // Automatica, 1990. – Vol. 26. – № 3.
19. Алиев Р. А., Захарова Э. К., Ульянов С. В. Нечеткие модели управления динамическими системами // Итога науки и техники. Сер. Техн. кибернетика. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1990. – Т. 29; 1991. – Т. 32.