

На правах рукописи

ЗЕЙНАЛОВ ЭЛЬЧИН РАЗИМ оглы

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СИНТЕЗА НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ
ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ОПИСЫВАЕМЫХ МОДЕЛЯМИ
С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

1203.01-Компьютерные науки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

БАКУ-2014

Работа выполнена в Институте Систем Управления Национальной
Академии Наук Азербайджана

Научный консультант:

Доктор технических наук, профессор

С.М. Джафаров

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Алекберли Ф.А;

Доктор технических наук, профессор

Рустамов Г.А;

Доктор технических наук, с.н.с.

Рзаев Р.Р.

Ведущая организация: ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ Национальной Академии Наук Азербайджана

Защита состоится 19-го сентября 2014г. в 14:00 на заседании
диссертационного совета Д 01.121 при Институте Систем Управления
Национальной Академии Наук Азербайджана по адресу: AZ 1141, г.
Баку, ул. Б. Вахабзаде, 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
Систем Управления НАН Азербайджана.

Автореферат разослан " __ " _____ 2014г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор философии по математике, доцент

А.Б.Пашаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие нефтедобычи и нефтеперерабатывающей промышленности в Азербайджанской Республике требует интенсификации как технологических процессов первичной и вторичной переработки нефти, так и установок, робототехнических комплексов машиностроительной отрасли. Это в свою очередь, требует создания эффективных высококачественных систем управления.

В настоящее время при проектировании систем управления такими высокоинтенсивными технологическими процессами инженер – проектировщик встречается с различного рода неопределенностями. Такими неопределенностями могут быть: неточное измерение регулируемых физических величин, недостаточность априори и апостериори информации, нестационарность и нелинейность объектов, желание в какой-либо форме использовать опыт человека при создании систем управления.

Использование новых технологий, современных машин и агрегатов, промышленных роботов и робототехнических комплексов в производственных процессах выдвигает новые задачи перед специалистами по управлению. Успешность решения этих задач зависит от умения инженера правильно использовать современные методы и средства теории управления. Перед современными системами автоматического управления (САУ) ставят очень разнообразные требования. Из числа таких требований необходимо отметить, что САУ должны иметь высокие показатели качества в динамике, устойчивости и интеллектуальности.

Для эффективной работы технологических процессов в интенсивных режимах ужесточаются требования качества САУ объектам управления, обладающим различного рода неопределенностями. Иными словами, САУ этими технологическими установками, робототехническими комплексами и роботами должны обладать интеллектуальностью и высокими показателями качества, в частности, переходные процессы САУ должны обладать максимальной динамической точностью и минимальностью интегрально квадратичной ошибки.

Основываясь на анализе научной литературы, можем отметить, что для объектов описываемых нестационарными, нелинейными и нечеткими математическими моделями (типа Mamdani или Takagi-

Sugeno), методы и средства синтеза и анализа регуляторов (обеспечивающих высокое качество управления) недостаточно развиты и поэтому, с научной точки зрения, решения этих проблем являются актуальными. Таким образом, тема диссертации «разработка методов и средств синтеза нечетких регуляторов для динамических объектов, описываемых моделями с различными типами неопределенности» является **актуальной**.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка методов синтеза: структур, баз знаний и настроечных параметров нечетких регуляторов для управления объектами, описываемых моделями с различными типами неопределенности: а) нечеткими моделями типа «Mamdani», б) нечеткими дифференциальными уравнениями с четкими коэффициентами; с) дифференциальными уравнениями с нечеткими коэффициентами, и д) нечеткими моделями типа TS (Takagi-Sugeno).

Для достижения этой цели в диссертационной работе необходимо решить нижеследующие задачи:

-1. Разработка метода синтеза и средства создания самонастраивающегося нечеткого регулятора, т.е. элементов управляющего устройства.

-2. Учитывая многосвязность и неопределенность модели объекта, сформулировать задачу синтеза нечеткого регулятора с переменной структурой и разработка метода решения.

-3. Разработка методики построения синтеза структуры многосвязного нечеткого регулятора с переменной структурой (СПС), базы знаний и параметров функции принадлежности нечетких термножеств.

-4. Разработка модели манипулятора промышленного робота, как многосвязного объекта управления, т.е. определения нелинейного нечеткого дифференциального уравнения, и выбор класса систем управления, т.е. нечеткого регулятора СПС.

-5. Разработка средств технической реализации нечетких многосвязных регуляторов СПС с моделями типа Mamdani в среде MATLAB для управления конкретным объектом - манипуляционным роботом типа PUMA.

-6. Разработка аналитического метода синтеза нечеткого регулятора, обеспечивающего высокие показатели качества (например, максимальную степень устойчивости) управления объектами,

описываемыми нечеткими дифференциальными уравнениями с четкими коэффициентами.

-7. Разработка метода параметрического синтеза различных нечетких регуляторов (с PI, PID, PD и P законами), которые обеспечивали бы максимальную степень устойчивости в системе управления объектами, описываемыми дифференциальными уравнениями с нечеткими коэффициентами.

-8. Разработка метода синтеза нечетких регуляторов для объектов, описываемых нечеткими моделями типа TS (Tagaki-Sugeno) с запаздывающим аргументом.

-9. Предлагая решение различных регулируемых обратных связей, разрабатывать структуры, базы знаний и параметры элементов нечеткого регулятора с TS моделью. Решить задачу параметрического синтеза регулятора с TS моделью, имеющейся в прямом - основном контуре САУ

-10. Разработка аналитического метода синтеза нечеткого TS регулятора, обеспечивающего высококачественное (без перерегулирования и максимальной степени устойчивости) управление объектами на примере манипуляционного робота с эластичным соединением, описываемым нелинейными моделями в пространстве состояний.

-11. Определение нечеткой модели нелинейного динамического объекта с нерегулярным (хаотическим) движением на основе наблюдений лишь за «входом-выходом»

-12. Разработка «S» моделей синтезированных нечетких САУ для компьютерной симуляции в среде MATLAB, например, системы управления манипуляционным роботом с эластичным соединением, описываемым нелинейной моделью.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели в данной диссертационной работе использованы: теория автоматического управления, теория бинарных систем с переменной структурой, теория нечетких множеств, теория нечетких дифференциальных уравнений, методы и средства математического моделирования.

Научная новизна. Основные результаты работы, представленные к защите и имеющие научную новизну, заключаются в следующем:

1. Разработаны методы и средства построения нечетких регуляторов СПС, описываемых моделями типа Mamdani для объектов,

обладающих существенной нелинейностью и неопределенностью, т.е.: а) предложена архитектура самонастраивающегося нечеткого регулятора СПС и база знаний формирования линий скольжения, основанной на состоянии изображающей точки в фазовом пространстве (плоскости), б) для многосвязного динамического объекта, обладающего нелинейностью и неопределенностью, предложена архитектура, определена база знаний нечетких переменных коэффициентов регулятора СПС и параметров функций принадлежности термножеств.

2. Определено, что манипуляционный робот типа PUMA, как объект управления, наиболее адекватно описывается многосвязным нелинейным дифференциальным уравнением с нечеткими коэффициентами. Такая модель удобна для компьютерной симуляции многосвязной нечеткой САУ СПС.

3. Разработана база знаний в виде таблицы лингвистических правил переменных структур и синтезированы параметры фаззификаторов, плоскости скольжения - переключения структур многосвязной нечеткой (МНЧ) САУ с СПС вторым и третьим соединением манипулятора робота PUMA. Предложенная МНЧ САУ СПС обладает более высокой «интеллектуальностью» по сравнению с обычными системами СПС, и обеспечивает более высокие показатели сравнительно с обычными нечеткими системами.

4. В предложенной МНЧ САУ СПС движение манипулятора управляется под влиянием прямого действия момента T_{mi}^d и по ошибке, вследствие чего, обеспечивается быстроедействие и точность САУ, а также изменение управления ограничено. Экспериментально определено, что одним из преимуществ разработанной МНЧ САУ СПС манипулятором робота PUMA является то, что амплитуда изменения управления сравнительно с обычными САУ СПС, существенно мала.

5. Разработан метод аналитического синтеза параметров нечетких регуляторов с P или PD законами, позволяющий высококачественную, возможную максимальную степень устойчивости и затухания колебаний, управление динамическими объектами, описываемыми нечеткими дифференциальными уравнениями с четкими коэффициентами.

6. Для объектов, описываемых дифференциальными уравнениями с нечеткими коэффициентами, разработан метод параметрического синтеза регуляторов с различной структурой (PI, PID,

PD и P), обеспечивающих в системе возможные высокие показатели качества - максимальную устойчивость и степень затухания колебаний.

7. Предложено расширение различных типов регулируемых обратных связей в САУ, на основе которого разработан метод синтеза структуры и параметров высококачественного (максимальной степени устойчивости) управления объектами, описываемых нечеткими TS моделями с запаздывающим аргументом.

8. Для нечеткого регулятора с регулируемыми обратными связями (НР с РОС) а) предложена структура НР с РОС и база знаний; б) разработан метод решения задачи параметрического синтеза регулятора с PID (или PI) законом управления, в результате этого, на примере для объекта второго порядка получена аналитическая зависимость показателя качества системы от параметров объекта; с) определена база знаний и параметры нечеткого фильтра, расположенного в цепи регулируемой обратной связи.

9. Для объектов, в частности, работа с эластичным соединением, описываемых в пространстве состояний нелинейными моделями, разработан аналитический метод синтеза регулятора с нечеткой TS моделью, который обеспечивает требуемые высокие показатели качества - максимальную степень устойчивости и аperiodические переходные процессы.

10. Предложена методика определения нечеткой модели на основе лишь наблюдений «входа-выхода» нелинейного объекта управления с нерегулярным (хаотическим) движением.

11. Разработаны средства технической реализации на базе пакетов Fuzzy Logic Toolbox и Simulink в среде MATLAB, синтезированных в диссертации нечетких САУ, например, МНЧ САУ СПС манипулятором робота PUMA, нечеткой САУ с регулируемой обратной связью, температурой верха ректификационной колонны и нечеткой САУ роботом с эластичным соединением.

Практическая ценность и реализация результатов диссертационной работы. Практическая ценность работы заключается в том, что использование разработанных методов и средств при создании САУ с различными типами неопределенности позволяют реализовать высокие показатели качества процессов управления. Используя методы синтеза, предложенные в диссертации, построены различные нечеткие САУ, в частности: -управление манипулятором робота с эластичным соединением с нечетким регулятором; - двухсвязная САУ 2-м и 3-м соединением манипулятора робота PUMA

на базе нечеткого регулятора с переменной структурой; САУ объекта с запаздывающим аргументом - температурой верха ректификационной колонны на базе нечеткого регулятора с различными регулируемыми обратными связями. Построенные нечеткие регуляторы, т.е. САУ различными объектами, были реализованы в среде MATLAB и проведены экспериментальные испытания.

Экспериментальные испытания подтвердили достоверность полученных научных результатов. Разработанные методы и средства построения различных нечетких САУ были использованы в учебном процессе (в составе дисциплин) при подготовке бакалавров и магистров по специальностям «Компьютерная инженерия» и «Робототехническая инженерия» в Азербайджанской Государственной Нефтяной Академии.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих Международных и Республиканских Конференциях:

- Second International Conference on Application of Fuzzy system and Soft Computing, Siegen, Germany, June 25-27, 1996;
- First International Conference on Soft Computing With Word in System Analysis, Decision and Control-Antalya, Turkey, June 6-8, 2001;
- Fifteens International Conference on Application of Fuzzy System and Soft Computing. Milan, Italy, September 17-18, 2002;
- Second international Conference on Soft Computing and Computing with Words in System Analysis, Decision and Control Antalya, Turkey, September 6-8, 2003;
- Third International Conference on Application of Fuzzy system and Soft Computing, Wiesbaden, Germany, October 5-7, 1998;
- Fourth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control. Turkey, Antalya, 27-28 August, 2007;
- Elm və təhsildə informasiya-kommunikasiya texnologiyalarının tətbiqi. Bakı 01-03 noyabr, 2007;
- Eighteens International Conference on Application of Fuzzy System and Soft Computing. Finland, Helsinki, 1-3 September, 2008;
- Azərbaycan xalqının ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 85 illiyinə həsr olunmuş “Texniki ali məktəblərdə təhsilin müasir problemləri” mövzusunda respublika elmi-praktiki konfransının materialları. Bakı, 2008;
- The second International Conference “Problems of Cybernetics and Informatics” Azerbaijan, Baku, 10-12 September, 2008;

- Fifth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control. North Cyprus, Famagusta, 2-4 September, 2009;
- Sixth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control. Turkey, Antalya, 1-2 September, 2011;
- Tenth International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing Lisbon, Portugal, August 29-30, 2012;
- Seventh International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control. Turkey, Izmir, 1-2 September, 2013

Публикации. По тематике диссертации опубликовано 37 научных работ, в том числе: 3 книги (1 монография), 32 статьи, большинство из которых опубликованы в зарубежных научных журналах и просидингах Международных Конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, полученных результатов, т.е. заключения, списка литературы и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 261 странице.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи, решаемые в диссертации, приведены основные научные положения, представляемые на защиту, и структура работы.

В первой главе осуществлен критический анализ научной литературы, посвященный методам синтеза регуляторов и средств их технической реализации, используемые для управления объектами, обладающими различного характера неопределенностями. На основе проведенного критического анализа определено, что в случаях когда неопределенности объектов обладают нестационарным, нелинейным или нечетким характером, (т.е. описываемые различного рода нечеткими дифференциальными уравнениями, а также для объектов с запаздывающим аргументом) эффективные методы управления ими, как с теоретической, так и с практической точки зрения недостаточно разработаны. На основе критического анализа определено, что для управления объектами, описываемыми нечеткими дифференциальными

уравнениями, методы синтеза регуляторов почти отсутствуют. В этой связи в параграфе 1.2 сформулированы задачи, решаемые в работе.

Во второй главе предлагается две архитектуры нечетких регуляторов с переменной структурой, выбор типа которого зависит от характера неопределенности и свойства объекта управления.

Для объектов функционирующих, в условиях нестационарного и нечеткого характера неопределенности, предлагается самонастраивающийся нечеткий регулятор с переменной архитектурой (СПС), архитектура которого представлена на рис1. Здесь BLO1 и BLO2 являются блоками логического нечеткого вывода, в соответствии с композиционным правилом Заде. На основе текущих нечетких множеств \tilde{C}_{sek} и \tilde{V} в блоке BLO1 определяется параметр линии скольжения C_i^s . В блоке BLO2 на основе текущих нечетких множеств C_i^s и \tilde{V} определяются текущие значения самонастройки нечетких терм-множеств переменной структуры \tilde{A}_i и \tilde{B}_i . Блоки Fuz и DF осуществляют операции фаззификации и дефаззификации соответственно. D-дифференциатор, Z-задержки, %-делитель, BVS-блок изменения структуры. FKB1, FKB2-соответствующие блоки хранения знания.

Постановку задачи синтеза системы управления СПС с самонастраиваемым скользящим режимом можно формализовать следующим образом.

Пусть поведение нестационарного и нечеткого динамического объекта описывается математической моделью

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \tilde{\varphi}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}) & (1) \\ \mathbf{x}(t) &= [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \mathbf{x} \in \mathbf{X}, & \mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_p]^T, \\ \mathbf{u} &= [u_1, u_2, \dots, u_m], & \mathbf{u} \in \mathbf{U}, \end{aligned}$$

где \mathbf{X} - n-мерный вектор состояния, \mathbf{u} - m-мерный вектор управляющих воздействий (в частности m=1), \mathbf{Z} - p-мерный вектор внешних возмущающих воздействий, причем в рассматриваемом случае предполагается, что $\mathbf{Z}(t) = \mathbf{Z}_0$ постоянная, $\tilde{\varphi}$ -нечеткая нелинейная функциональная зависимость, T-знак транспонирования.

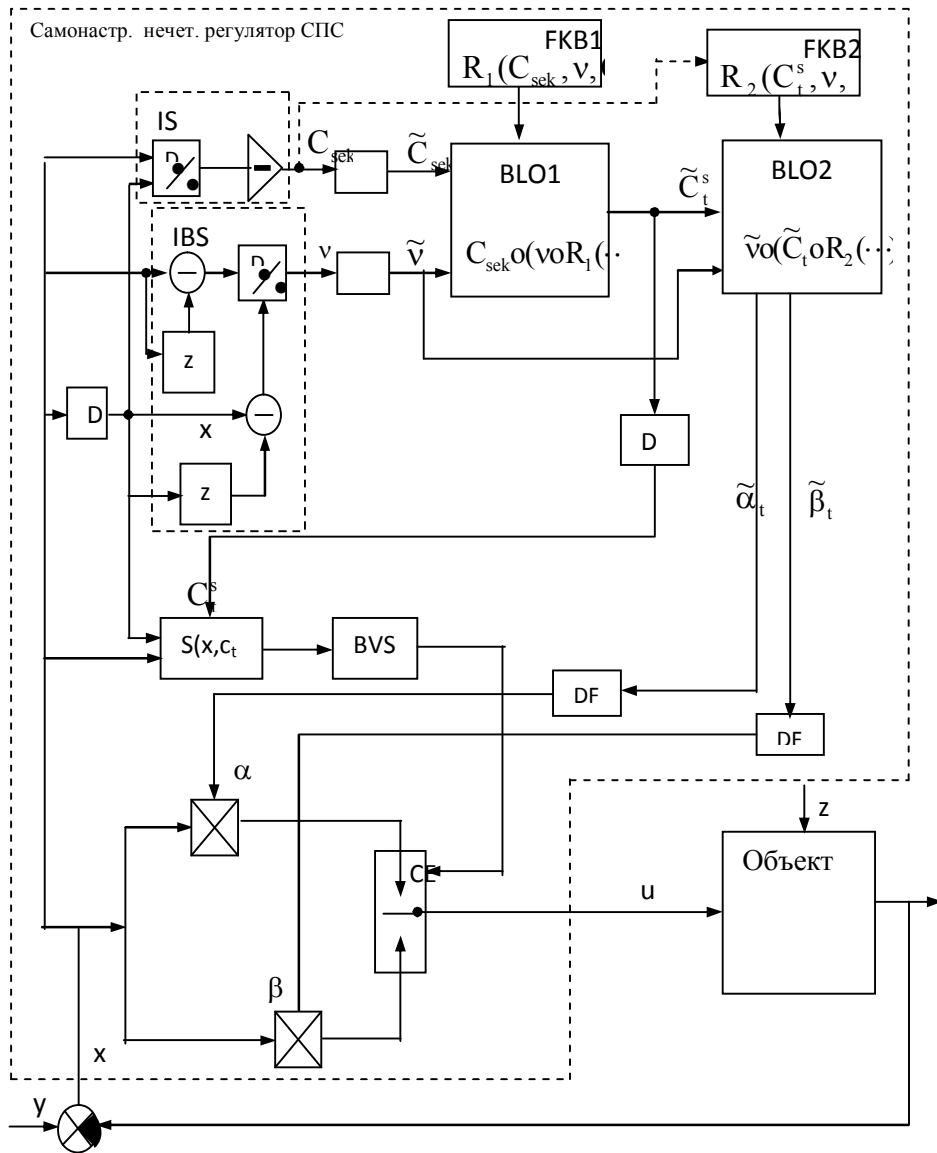


Рис.1. Архитектура самонастраивающегося нечеткого регулятора СПС

Для объекта (1) требуется определить такой самонастраивающийся нечеткий регулятор (управление) с переменной структурой

$$u = \tilde{\psi}(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}) \cdot x \quad (2)$$

$$\tilde{\psi}(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}) = f(S(x, \tilde{C}_t^s), \tilde{v}(x)), \quad (3)$$

$$C_t^s = [C_{1t}^s, C_{2t}^s, \dots, C_{n-1,t}^s] \quad \alpha_t = [\alpha_{1t}, \alpha_{2t}, \dots, \alpha_{nt}],$$

$$\beta_t = [\beta_{1t}, \beta_{2t}, \dots, \beta_{nt}], \quad v(x) = [v_1, v_2, \dots, v_{n-1}]$$

$$\tilde{v} = \{v, \mu(v)\}, \quad \tilde{C}_t^s = \{C^s, \mu(C^s)\} \quad (4)$$

$$\tilde{\alpha} = \{\alpha, \mu(\alpha)\}, \quad \tilde{\beta} = \{\beta, \mu(\beta)\}, \quad v_i = \frac{\dot{x}_{i-1}}{\dot{x}_i}, \quad i = \overline{2, n}; \quad (5)$$

чтобы система за конечное время $t=T$ переводилась из начального состояния

$$x(t_0) = x_0 \quad (\text{или } \tilde{x}(t_0) = \tilde{x}_0), \quad (6)$$

в конечное состояние

$$x(T) = x_T = 0 \quad (\text{или } \|x_T\| \leq r, \quad r \in [0, 0.01x_0]) \quad (7)$$

по скользящему режиму с коэффициентом \tilde{C}_t^s , т.е. по гиперплоскости $S(x, \tilde{C}_t^s) = \tilde{0}$,

Так как объект является управляемым, предположим, что в системе (1)-(4) всегда возможно создать скользящий режим. Поэтому в ближайшей окрестности гиперплоскости $S(x, C_t^s) = 0$ для нечеткой структуры $\tilde{\psi} = \tilde{\alpha}_t$ и $\tilde{\psi} = \tilde{\beta}_t$ можно направить фазовую траекторию системы на $S(x, \tilde{C}_t^s) = 0$. Для этого в фазовом пространстве оценивается расположение изображающей точки системы (1)-(4). Например, в текущий момент времени оценивается изменение скорости фазовой траектории - v и определив сектор фазовой плоскости $S(x, \tilde{C}_{sek}^s)$,

определяем состояние системы относительно возможной наилучшей скользящей линии $S(\mathbf{x}, \tilde{C}_t^s)$.

Определяем лингвистические правила, т.е. отношение $R_{1,i}(C_{sek}, v, C_t^s)$ в следующем виде:

$R_{1,i}(\dots)$: **ЕСЛИ** скорость изменения фазовой траектории $\tilde{v} = PB$ и изображающая точка в первом секторе $C_{sek} = K$, **ТОГДА** угловой коэффициент линии скольжения $\tilde{C}_t^s = CK$, $sekt = \overline{1,4}$ (8)

$R_{2,i}(C_t^s, v, \alpha_i)$: **ЕСЛИ** коэффициент линии скольжения $\tilde{C}_t^s = CK$ и скорость изменения фазовой траектории $\tilde{v} = PB$, **ТОГДА** коэффициент структуры увеличить на величину $\Delta\alpha\beta$, т.е. $\tilde{\alpha}_t = \tilde{\alpha}_{t-1} \oplus \Delta\tilde{\alpha} B$ (9)

при $sekt=j$ и $h=i$, т.е. $S_k < 0, S_0 > 0, S_b > 0, v < 0$

$R_{2,i\beta}(C_t^s, v, \beta_t)$: **ЕСЛИ** коэффициент линии скольжения $\tilde{C}_t^s = CK$ и скорость изменения фазовой траекторий $\tilde{v} = NB$, **ТОГДА** коэффициент бегта структуры уменьшить на величину $\Delta\beta K$ (т.е. $\tilde{\beta}_t = \tilde{\beta}_{t-1} \ominus \Delta\tilde{\beta} K$)(10)

Соответствующие таблицы лингвистических правил для $\tilde{C}_t^s, \tilde{\alpha}_t, \tilde{\beta}_t$ приводятся в диссертации.

Определено, что если фазовая траектория самонастраивающейся нечеткой системы управления СПС некоторое время находится на линии скольжения $S_k(x, \tilde{C}_k^s)$, то в последующем отрезке времени наилучшая (оптимальная) скользящая линия будет $S_o(x, \tilde{C}_o^s)$.

Во втором параграфе предложена архитектура и база знаний многосвязного нечеткого регулятора СПС для управления многосвязным динамическим объектом-манипуляционным роботом, функционирующий в условиях неопределенности. Определено, что робот PUMA (на пример 2-й и 3-й соединения) как объект автоматического управления описывается нечеткой моделью вида:

$$\tilde{D}_{2,2}\ddot{\theta}_2 + \tilde{D}_{2,3}\ddot{\theta}_3 + \tilde{h}_2(\theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3) + \tilde{G}_2(\theta) + \tilde{L}_2 m = \tilde{U}_2 \quad (11)$$

$$\tilde{D}_{2,3}\ddot{\theta}_2 + \tilde{D}_{3,3}\ddot{\theta}_3 + \tilde{h}_3(\theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3) + \tilde{G}_3(\theta) + \tilde{L}_3 m = \tilde{U}_3$$

Задачу синтеза нечеткого регулятора для многосвязного объекта можно формализовать следующим образом:

Для манипуляционного робота (11) требуется синтезировать такой двухсвязный нечеткий регулятор с переменной структурой

$$\begin{cases} \tilde{U}_2(t) = f_1(e_2, \dot{e}_2, \tilde{u}_3), \\ \tilde{U}_3(t) = f_2(e_3, \dot{e}_3, \tilde{u}_2) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} e_i(t) = \theta_i^d(t) - \theta_i(t), \\ \dot{e}_i(t) = \dot{\theta}_i^d(t) - \dot{\theta}_i(t) \end{cases} \quad (13)$$

чтобы управляемые переменные θ_i ($i=2,3$) за конечное время T_K следили задающие воздействия θ_i^d ($i=2,3$) без перерегулирования и с минимальным значением интегрального квадратичного критерия качества, т.е.

$$J_i[e, u] = \int_0^T (\lambda_{1i} e_i^2 + \lambda_{2i} \dot{e}_i^2 + \lambda_{3i} u_i^2) dt \rightarrow \min_{u \in U} \quad (i=2,3)$$

$\Delta\beta K$

В модели объекта управления - манипулятора робота (11) $\tilde{D}_{ij}, \tilde{h}(t), \tilde{G}(t)$ нечеткие коэффициенты нелинейно зависят от управляемых переменных θ_i и $\dot{\theta}_i$ ($i=2,3$). В (12) и (13) переменные $e_i(t)$, ($i=2,3$) являются ошибкой-отклонением углов поворота i -го соединения от планированных θ_i^d , соответственно.

Для объекта (11) можно обеспечить автономность в многосвязной САУ путем соответствующего подбора параметров многосвязного нечеткого регулятора. Требования автономности и малость перерегулирования можно удовлетворить в классе систем СПС сравнительно легче, чем в других обычных системах.

Отметим, что в обычных СПС в скользящем режиме амплитуда и частота изменений управляющих воздействий САУ являются достаточно высокими (большими). Реализация таких управлений в

большинстве случаев, либо недопустима (невозможна), либо сложна. Поэтому, учитывая неопределенности нечеткого объекта и характер сформулированной выше задачи синтеза управления роботом PUMA, предлагается выбрать архитектуру многосвязного нечеткого регулятора СПС по выражениям

$$\tilde{U}_2(t) = \tilde{\psi}_{21}e_2(t) + \tilde{\psi}_{22}\dot{e}_2(t) + \tilde{\psi}_{23}e_3(t), \quad (14)$$

$$\tilde{U}_3(t) = \tilde{\psi}_{31}e_3(t) + \tilde{\psi}_{33}\dot{e}_3(t) + \tilde{\psi}_{32}e_2(t),$$

где $\tilde{\psi}_{ij}$ скачкообразно изменяющиеся нечеткие коэффициенты, которые определяются нижеследующими логическими законами:

$$\tilde{\psi}_{i1} = \begin{cases} \tilde{\alpha}_{i1}, & \text{если } e_i S_i \geq 0, \\ \tilde{\beta}_{i1}, & \text{если } e_i S_i < 0, \end{cases} \quad (15)$$

$$\tilde{\psi}_{i2} = \begin{cases} \tilde{\alpha}_{i2}, & \text{если } \dot{e}_i S_i \geq 0, \\ \tilde{\beta}_{i2}, & \text{если } \dot{e}_i S_i < 0, \end{cases} \quad (16)$$

$$\tilde{\psi}_{ij} = \begin{cases} \tilde{\alpha}_{ij}, & \text{если } e_j S_i \geq 0, \\ \tilde{\beta}_{ij}, & \text{если } e_j S_i < 0, \end{cases} \quad (17) \quad i=2,3; j=2,3; \\ i \neq j$$

$$S_2 = C_{21}e_2 + C_{22}\dot{e}_2 + C_{23}e_3, \quad S_3 = C_{31}e_3 + C_{33}\dot{e}_3 + C_{32}e_2, \quad (18)$$

Здесь S_2 и S_3 плоскости скольжений или переключений структур. C_{ij} - коэффициенты, определяющие положение плоскости переключений в фазовом пространстве. Из условия удовлетворения требуемого качества системы управления выбираются значения коэффициентов C_{ij} ($i=2,3; j=1,3$). В формулах (15)-(17) $\tilde{\alpha}_{ij}$ и $\tilde{\beta}_{ij}$ ($i=2,3; j=1,2,3$) являются нечеткими коэффициентами, которые определяются в зависимости от ошибки управления каждого соединения e_i , скорости изменения ошибки \dot{e}_i и расположения движения относительно плоскостей скольжения $S_3(e_3, \dot{e}_3, e_2) = 0; S_2(e_2, \dot{e}_2, e_3) = 0$.

Нечеткие параметры $\tilde{\alpha}_{ij}$ и $\tilde{\beta}_{ij}$ определяются по выражениям

$$\begin{cases} \tilde{\alpha}_{ijr} = \tilde{E}_{ir} \circ (\dot{E}_{ir} \circ R_{ij}(e_i, \dot{e}_i, \alpha_{ij})), & \text{если } e_i S_i \geq 0, \\ \tilde{\beta}_{ijr} = E_{ir} \circ (\dot{E}_{ir} \circ R_{ij}(e_i, \dot{e}_i, \beta_{ij})), & \text{если } e_i S_i < 0, \end{cases}$$

$$r = \{1, 2, \dots, 7\}, i = \{2, 3\}, j \in \{1, 2, 3\}, i \neq j$$

Нечеткие отношения $R_{ij}(e_i, \dot{e}_i, \psi_{ij})$, определяются на основе таблиц четырех видов лингвистических правил (ЛП).

а) Для изображающей точки фазовой траектории, выполняющей условие $e_i S_i \geq 0, i = 2, 3$, лингвистические правила имеют вид:

«ЕСЛИ ошибка управления i -го соединения манипулятора (например 2-го) $\tilde{e}_i = NB$ (негатив большая) И скорость изменения ошибки $\tilde{\dot{e}}_i = NS$ (негатив малая), ТОГДА значение α_i структуры $\tilde{\alpha}_i = PS$ (позитив малая)», иначе ... (19)

б) Для изображающей точки фазовой траектории, выполняющей условие $e_i S_i < 0, i = 2, 3$ ЛП имеет вид:

«ЕСЛИ ошибка управления i -го соединения манипулятора $\tilde{e}_i = PM$ (позитив средняя) И скорость изменения ошибки $\tilde{\dot{e}}_i = NB$, ТОГДА значение β_i структуры $\tilde{\beta}_i = NB$, иначе ... (20)

с) Для состояния системы, удовлетворяющей условие $e_3 S_2 \geq 0$

«ЕСЛИ ошибка управления второго соединения $\tilde{e}_2 = PS$ И ошибка управления третьего соединения $\tilde{e}_3 = NS$, ТОГДА значение α_{23} структуры $\tilde{\alpha}_{23} = PVS$ (позитив очень малая)», иначе ... (21)

д) Для состояния системы, удовлетворяющей условие $e_3 S_2 < 0$

«ЕСЛИ ошибка управления второго соединения $\tilde{e}_2 = NS$ И ошибка управления третьего соединения $e_3 = PV$, ТОГДА значения β_{23} структуры $\tilde{\beta}_{23} = NM$ », иначе ... (22)

Из (19) и (20) видно, что лингвистические правила нечеткого управления СПС по скорости похожие. На основе лингвистических правил (19)-(22) строим базу знаний (БЗ) двухсвязного нечеткого регулятора СПС. В диссертации эти БЗ синтезированы и представлены 12 ТЛП, из которых две ТЛП представлены ниже в таблицах 1 и 2

Табл.1

		\tilde{e}_2						
		NB	NM	NS	ZER	PS	PM	PB
\tilde{e}_2	NB	PB	PVS	PS				
	NM	PB	PS	PVS				
	NS	PB	PB	PVS	PS			
	ZER	PB	PM	PS	PS	PM	PM	PB
	PS	PS	PM	PM	PB	PM	PM	PB
	PM	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB
	PB	PVS	PVS	PM	PB	PVB	PVB	PVB

Табл.2

		\tilde{e}_2						
		NB	NM	NS	ZER	PS	PM	PB
\tilde{e}_2	NB							NVS
	NM						NVS	NB
	NS					NVS	NM	NB
	ZER			NVS				
	PS	NM	NVS					
	PM	NB	NS					
	PB	NVB						

 $\tilde{\beta}_{21}$

В третьей главе на примере многосвязной нечеткой системы управления разработаны средства технико-программной реализации нечетких регуляторов с моделями типа Mamdani в среде MATLAB и осуществлен анализ на основе компьютерной симуляции.

В виду того, что структурная схема многосвязных нечетких (МНЧ) регуляторов СПС в САУ манипуляционным роботом типа PUMA является сложной, при разработке ее «S-модели» использованы свойства подсистемы пакета «SIMULINK». Поэтому сначала разработана подсистема «S-модели», являющаяся отдельным функциональным блоком многосвязного нечеткого регулятора СПС в «SIMULINK», а затем в интеграции с пакетом «Fuzzy Logic Toolbox» осуществлена техническая реализация всей системы управления манипуляционным роботом в среде MATLAB. Эти подсистемы приведены в диссертационной работе. (Например, $\text{tetta } 2d(\theta_2^d)$, $\text{tetta } 2'd(\dot{\theta}_2^d)$, $\text{tetta } 2''d(\ddot{\theta}_2^d)$, $\text{tetta } 3d(\theta_2^d)$, $\text{tetta } 3d(\dot{\theta}_2^d)$, $\text{tetta } 3d(\ddot{\theta}_2^d)$ - формирующие задания и их первые и вторые производные, $Psi21 * e2$, $Psi22 * e2'$, $Psi23 * e3$, $Psi31 * e3$, $Psi32 * e3'$, $Psi33 * e2$ - шесть подсистем, формирующие нечеткие переменные, коэффициенты ψ с произведением на e).

Задающие устройства МНЧ САУ СПС вырабатывают желаемый запланированный выход объекта, т.е. задание системы $\theta_i^d(t)$ ($i=2,3$) на протяжении времени $t \in [0, T_T]$ и ее скорость. Запланированная траектория системы θ_i^d и $\dot{\theta}_i^d$ в зависимости от времени задаются как решения дифференциальных уравнений $T_{1i} T_{2i} \ddot{\theta}_i^d(t) + (T_{1i} + T_{2i}) \dot{\theta}_i^d(t) + \theta_i^d(t) = \Delta \theta_{i \text{ tap}}^d$ ($i=2,3$), правые части (задания), которых имеют следующие значения:

$$\Delta \theta_2^d = \frac{\pi}{2}, \quad \Delta \theta_3 = \frac{-\pi}{2} \quad \text{Значения параметров}$$

$T_{12} = 0.08c$; $T_{22} = 0.3c$; $T_{13} = 0.07c$; $T_{32} = 0.25c$; подобраны таким образом, чтобы в траекториях звеньев робота точки «отхода» и «подхода» были близкими к начальной и конечной точке, при этом время устанавливаемого процесса была бы в пределах 1.5 - 2.5 секунд.

На рисунке 2 показан переходный процесс слежения по планируемому движению $\theta_2^d(t)$ многосвязной нечеткой САУ СПС третьего соединения манипулятора робота PUMA, а на рис. 3 представлена фазовая траектория в плоскости $(\theta_3, \dot{\theta}_3)$. Из рисунков видно, что в МНЧ САУ СПС через некоторое время в системе начинается скользкий режим, который продолжается до конца переходного процесса. Такой режим более ярко наблюдается в интервале времени от 0.4 - 1,5 сек переходного процесса.

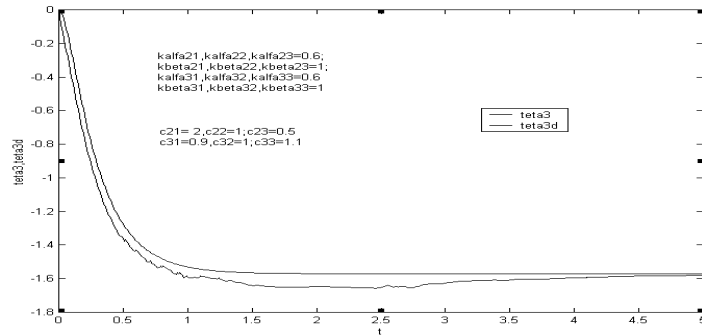


Рис. 2. Переходный процесс управления 3-м соединением манипулятора робота PUMA по запланированной траектории.

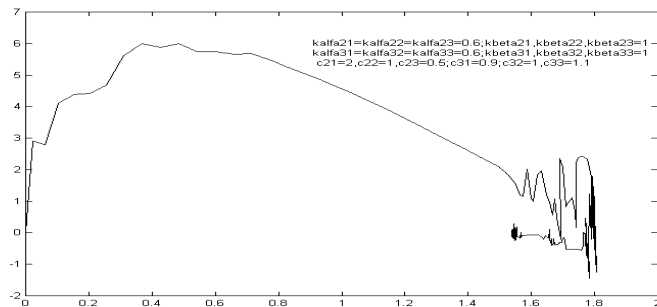


Рис. 3. Фазовая траектория на плоскости $(\theta_3, \dot{\theta}_3)$ САУ 3-м соединением манипулятора робота PUMA

В четвертой главе (параграф 4.1) разработан метод синтеза нечетких регуляторов для управления одним классом объектов, описываемых различными порядковыми нечеткими дифференциальными уравнениями с четкими коэффициентами.

Пусть движение объекта, обладающего неопределенностью, описывается различными нечеткими дифференциальными уравнениями:

$$\tilde{X}^{(n)}(t) + a_1 \tilde{X}^{(n-1)}(t) + \dots + a_n \tilde{X}(t) = k_{ob} \tilde{U}(t) \quad (23)$$

Здесь $k_{ob}, a_j, j = \overline{1, n}$ - постоянные коэффициенты, которые являются обычными четкими числами, $\tilde{U}(t)$ - управляющее воздействие с нечетко-множественным значением, $\tilde{X}(t)$ - неизвестная функция с нечетко-множественным значением, характеризующая состояние динамического объекта.

Нечеткие функции $\tilde{X}(t)$ и $\tilde{X}^{(i)}(t)$ обладают нижеследующими свойствами.

$$\tilde{X}(t) = U_{\alpha \in (0,1]} \alpha X^\alpha(t); \forall \alpha \in (0,1]; X^\alpha(t) = (\tilde{X}(t))^\alpha = [X_L^\alpha(t), X_R^\alpha(t)],$$

$$X_L^\alpha(t) = \inf X^\alpha(t); X_R^\alpha(t) = \sup X^\alpha(t), X_L^\alpha(t) > -\infty; X_R^\alpha(t) < +\infty$$

$$\tilde{X}^{(i)}(t)^\alpha = U_{\alpha \in (0,1]} (X^\alpha(t))^{(i)} = U_{\alpha \in (0,1]} [(X_L^\alpha(t))^{(i)}, (X_R^\alpha(t))^{(i)}] \quad (24)$$

$$(X^\alpha(t))^{(i)} = [\min(X_L^{\alpha(i)}(t), X_R^{\alpha(i)}(t)), \max(X_L^{\alpha(i)}(t), X_R^{\alpha(i)}(t))],$$

Нечеткое управляющее воздействие формируется выражением

$$\tilde{U}(t) = - \sum_{j=0}^r k_{pj} \tilde{X}^{(j)}(t), \tilde{X}^{(0)}(t) = \tilde{X}(t), r < n, \quad (25)$$

где $k_{pj} (j = \overline{1, r})$ - параметры настройки нечеткого регулятора (25).

Если в качестве показателя нечеткой системы принимать степень устойчивости, тогда задачу синтеза регулятора (25) САУ объектом можно сформулировать следующим образом.

Для динамического объекта (23) требуется определить такое управление $-\tilde{U}(t)$ вида (25) (или $k_{pj} (j = \overline{0, r})$), чтобы при переводе объекта из заданного начального состояния

$$\tilde{X}(t_0) = \tilde{X}_0, \quad \tilde{X}^{(i)}(t_0) = \tilde{X}_0^{(i)} \quad (26)$$

$$\text{или } X_0^\alpha = [X_{OL}^\alpha, X_{OR}^\alpha], \quad X_0^{\alpha(i)}(t) = [X_{OL}^{\alpha(i)}, X_{OR}^{\alpha(i)}],$$

в конечном состоянии $\tilde{X}(T) = \tilde{0}$, степень устойчивости системы управления (23), (25) была бы максимальной, т.е.

$$J = \max_{k_{p_i} \in K_{p_i}} \left\{ -\operatorname{Re} \lambda_\alpha(a_1, a_2, \dots, a_n, k_{p_1}, \dots, k_{p_m}) \right\},$$

$$K_{p_i} = [K_{p_i}^{\min}, K_{p_i}^{\max}], \quad K_{p_i}^{\min} \geq 0, \quad i = \overline{1, r}$$

Следует отметить, что большинство объектов управления технологическими процессами практически описываются дифференциальными уравнениями, порядок которых не превышает 3.

Пусть порядок нечеткого дифференциального уравнения (23) $n=3$, а порядок нечеткого регулятора (25) $r=1$. Тогда нечеткая система (23), (25) описывается нижеследующим дифференциальным уравнением вида:

$$\tilde{X}^{(3)}(t) + a_1 \tilde{X}^{(2)}(t) + (a_2 + k_{ob} k_{p_1}) \tilde{X}^{(1)}(t) + (a_3 + k_{ob} k_{p_0}) \tilde{X}(t) = \tilde{0},$$

$$\tilde{X}(t_0) = \tilde{X}_0, \quad \tilde{X}^{(1)}(t_0) = \tilde{X}_0^{(1)}, \quad \tilde{X}^{(2)}(t_0) = \tilde{X}_0^{(2)} \quad (27)$$

где $\tilde{0}$ - нечеткий нуль. Нечеткое дифференциальное уравнение (27) и соответствующие им начальные значения на основе (19)-(24) можно представить следующим образом:

$$X_L^{\alpha(3)}(t) + a_1 X_L^{\alpha(2)}(t) + (a_2 + k_{ob} k_{p_1}) X_L^{\alpha(1)}(t) + (a_3 + k_{ob} k_{p_0}) X_L^\alpha(t) = 0_L^\alpha,$$

$$X_{OL}^\alpha, \quad X_{OL}^{\alpha(1)}, \quad X_{OL}^{\alpha(2)}$$

$$X_R^{\alpha(3)}(t) + a_1 X_R^{\alpha(2)}(t) + (a_2 + k_{ob} k_{p_1}) X_R^{\alpha(1)}(t) + (a_3 + k_{ob} k_{p_0}) X_R^\alpha(t) = 0_R^\alpha,$$

$$X_{OR}^\alpha, \quad X_{OR}^{\alpha(1)}, \quad X_{OR}^{\alpha(2)}$$

Отметим, что α - сечение нечеткого нуля, $0^\alpha = [0_L^\alpha, 0_R^\alpha]$ является достаточно малым интервалом, а в частном случае, может быть точкой «0».

Если принять нижеследующие обозначения,

$$Y_L^\alpha = X_L^\alpha + \frac{0_L^\alpha}{a_3 + k_{ob} k_{p_0}}; \quad Y_R^\alpha = X_R^\alpha - \frac{0_R^\alpha}{a_3 + k_{ob} k_{p_0}}, \quad -1 \ll 0_L^\alpha < 0$$

То вышеприведенные дифференциальные уравнения могут быть представлены нижеследующими обычными дифференциальными уравнениями

$$\begin{cases} Y_L^{\alpha(3)}(t) + a_1 Y_L^{\alpha(2)}(t) + (a_2 + k_{ob} k_{p_1}) Y_L^{\alpha(1)}(t) + (a_3 + k_{ob} k_{p_0}) Y_L^\alpha(t) = 0, \\ Y_L^{\alpha(i)}(t_0) = X_L^{\alpha(i)}(t_0), Y_L^\alpha(t_0) = X_L^\alpha(t_0) + 0_L^\alpha / (a_3 + k_{ob} k_{p_0}), i = 1, 2. \\ Y_R^{\alpha(3)}(t) + a_1 Y_R^{\alpha(2)}(t) + (a_2 + k_{ob} k_{p_1}) Y_R^{\alpha(1)}(t) + (a_3 + k_{ob} k_{p_0}) Y_R^\alpha(t) = 0, \\ Y_R^{\alpha(i)}(t_0) = X_R^{\alpha(i)}(t_0), Y_R^\alpha(t_0) = X_R^\alpha(t_0) - 0_R^\alpha / (a_3 + k_{ob} k_{p_0}). \end{cases} \quad (28)$$

Дифференциальные уравнения (28) описываются одним и тем же характеристическим уравнением:

$$P_3 = \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + (a_2 + k_{ob} k_{p_1}) \lambda + (a_3 + k_{ob} k_{p_0}) = 0 \quad (29)$$

Для того, чтобы все решения дифференциальных уравнений (28) были схожими, иными словами система управления была бы устойчивой и причем с максимальной системой устойчивости, тогда параметры k_{p_1} , k_{p_0} нечеткого регулятора (25) можно определить нижеследующим образом. Предположим что k_{p_1} , k_{p_0} выбрали таким образом, что все три корня характеризующего уравнения (29) расположены на левой полуплоскости в плоскости корней, причем один из них является отрицательным действительным числом, а два корня комплексными, действительные части которых равны значению действительного корня.

Этот случай расположения корней представляет значительный интерес с точки зрения синтеза САУ, таким образом, предполагаемые корни уравнения (29) расположены следующим образом

$$\lambda_1 = -J; \quad \lambda_2, \lambda_3 = -J \pm j\omega = -J \left(1 \pm j \frac{1}{m} \right), \quad (30)$$

где J - степень устойчивости системы, m - степень затухания колебаний. Учитывая (30), можем составить характеристическое уравнение системы, выраженное через корни

$$\Phi_3(\lambda) = \lambda^3 + 3J\lambda^2 + J^2\left(3 + \frac{1}{m^2}\right)\lambda + J^3\left(1 + \frac{1}{m^2}\right) = 0 \quad (31)$$

Получив первые и вторые производные от (29) и (31) относительно λ и учитывая их равенство, определяем аналитические выражения для параметров настройки регулятора в зависимости от параметров объекта и качества - степени устойчивости и затухания колебаний переходного процесса управления (например, для случая $n=3$ и $r=1$):

$$\begin{cases} J = a_1 / 3 \\ k_{p1} = \left(J^2 \left(3 + \frac{1}{m^2} \right) - a_2 \right) / k_{ob} = \left(a_1^2 \left(3 + \frac{1}{m^2} \right) - 9a_2 \right) / 9k_{ob} \\ k_{p0} = \left(J^3 \left(1 + \frac{1}{m^2} \right) - a_3 \right) / k_{ob} = \left(a_1^3 \left(1 + \frac{1}{m^2} \right) - 27a_3 \right) / 27k_{ob}, m > 0 \end{cases}$$

Задав степень затухания значения, начиная с некоторого $m=m_0 > 0$ и затем придав приращение для m , можно подобрать такой $m^*=M$, чтобы переходный процесс системы управления удовлетворял требуемым показателям качества: времени регулирования и динамической точности.

Для объектов, описываемых дифференциальными уравнениями с нечеткими коэффициентами, задача синтеза регуляторов - управления формализована в параграфе 4.2 и решена предложенным методом.

Пусть состояние объекта управления описывается нижеследующим дифференциальным уравнением с нечетким коэффициентом:

$$\sum_{i=0}^{n-2} \tilde{b}_{n-i} x^{(i)}(t) = \tilde{k}_{ob} u(t) \quad (32)$$

Здесь $\tilde{b}_{n-i}, \tilde{k}_{ob}, i = \overline{1, n}$ нечеткие положительные числа. Требуется синтезировать такой нечеткой

$$\text{регулятор } u(t) = \sum_{j=0}^v \tilde{k}_{pj} x^{(j)}(t), \quad x^{(0)}(t) = x(t), \quad v \leq n-1, \quad (33)$$

чтобы при условиях ограниченности универсумов $K_{pj}^{\min} \leq K_{pj} \leq K_{pj}^{\max}$, нечетких параметров регулятора $\tilde{k}_{pj} \in K_{pj}$, в системе

(32), (33) обеспечивалась оптимальность критериев качества, в частности, максимальная степень устойчивости и затухания колебаний

$$\tilde{J}_{on} = \max(-\text{Re} \lambda_{on}(\tilde{b}, \tilde{k}_p)), \quad (34)$$

$$\tilde{m}_{on} = \max \left| \frac{\text{Re} \lambda(\tilde{b}, \tilde{k}_p)}{\text{Im} \lambda(\tilde{b}, \tilde{k}_p)} \right|, \quad \tilde{k}_p \in K_p$$

Выше сформулированную задачу синтеза, т.е. определение оптимальных параметров $\tilde{k}_p = (\tilde{k}_{p0}, \tilde{k}_{p1}, \dots, \tilde{k}_{pv})$ нечеткого регулятора можно решить аналогично вышеприведенному. Для этого выбрав один из нечетких P, PI и PID законов регулирования, составляем характеристическое уравнение замкнутой системы управления (32), (33):

$$P_n(\lambda) = \begin{cases} \tilde{b}_0 \lambda^3 + (\tilde{b}_1 - \tilde{k}_{ob} \tilde{k}_{p2}) \lambda^2 + (\tilde{b}_2 - \tilde{k}_{ob} \tilde{k}_{p1}) \lambda + \tilde{k}_{ob} \tilde{k}_{p0} = 0 \\ \text{если - PID закон,} \end{cases} \quad (35)$$

Следующим этапом решения задачи является осуществление сечения на уравне $\alpha_{\min} = \alpha_m$ нечеткого уравнения (35). В результате этого получим характеристическое уравнение с интервальными коэффициентами:

$$P_{ni}(\lambda) = \lambda^3 + \bar{a}_{1i} \lambda^2 + \bar{a}_{2i} \lambda + \bar{a}_{3i} = 0, \quad i = 2, \quad (36)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{a}_{1,2} &= [\tilde{a}_{1,2}]^{a_m} = [\tilde{b}_1 - \tilde{k}_{ob} \cdot \tilde{k}_{p2}]^{a_m} = [L_{1,2}^L, L_{1,2}^R] \\ \bar{a}_{2,2} &= [\tilde{a}_{2,2}]^{a_m} = [\tilde{b}_2 - \tilde{k}_{ob} \cdot \tilde{k}_{p1}]^{a_m} = [L_{2,2}^L, L_{2,2}^R] \\ \bar{a}_{3,2} &= [\tilde{a}_{3,2}]^{a_m} = [\tilde{k}_{ob} \cdot \tilde{k}_{p0}]^{a_m} = [L_{3,2}^L, L_{3,2}^R] \end{aligned} \right\}$$

Основываясь на теореме Харитонова об исследовании решений дифференциальных уравнений с интервальными коэффициентами, можем исследовать устойчивость нечеткой замкнутой системы в соответствии с анализом корней характеристического уравнения (36) с интервальными коэффициентами, поэтому уравнения с интервальными коэффициентами можно представить четырьмя уравнениями с обычными коэффициентами [3,4,8]:

$$\begin{aligned}
P_{ni}^1(\lambda) &= \lambda^3 + L_{1i}^L \lambda^2 + L_{2i}^R \lambda + L_{3i}^R = 0, \\
P_{ni}^2(\lambda) &= \lambda^3 + L_{1i}^R \lambda^2 + L_{2i}^L \lambda + L_{3i}^L = 0, \\
P_{ni}^3(\lambda) &= \lambda^3 + L_{1i}^R \lambda^2 + L_{2i}^R \lambda + L_{3i}^L = 0, \\
P_{ni}^4(\lambda) &= \lambda^3 + L_{1i}^L \lambda^2 + L_{2i}^L \lambda + L_{3i}^R = 0, \quad i = 1, 2
\end{aligned} \tag{37}$$

В выражениях (36) и (37) индекс i указывает на тип использованного нечеткого регулятора, например, при $i=2$ использован PID закон.

Выше сформулированная задача синтеза решается для случая, когда типом регулятора является нечеткий PID закон, а корни уравнения (37) распределены в соответствии (30).

Учитывая это предположение, характеристические уравнения (37) можно выразить через корни, а затем, получив первые и вторые производные по λ и приравнявая соответствующие производные (37), определяются интервальные значения возможно максимальной степени устойчивости $[J_{np}]$ и параметров настройки k_{p0}^M, k_{p1}^M аналитически, а

$[k_{p2}^M]$ путем подбора. Медиана нечетких параметров настройки k_{pj}^M ($j = 0, 1; i = 2$) вычисляется непосредственно решением исходной задачи синтеза для случая, когда функция принадлежности нечетких коэффициентов объекта равны единице. Для нечеткого PID регулятора медиана параметров настройки и степени устойчивости оценивается следующими аналитическими выражениями:

$$\begin{aligned}
\kappa_{p1}^M = \kappa_{p1}^{MPID} &= \left(\frac{b_2^m - 3J_{np}^2}{\kappa_{ob}^M} \right); \kappa_{p0}^M = I_{np}^3 / k_{ob}^M; J_{np} = \frac{b_1^M - \kappa_{om}^M \kappa_{p2}}{3} \\
0 < \kappa_{p1}^M \in K_{p1}, \quad 0 < \kappa_{p0}^M \in K_{p0}, \quad &\text{при } 0 < m_{np} < m^*
\end{aligned}$$

Отметим, что при синтезе САУ астатических объектов на устойчивость системы надо особо уделять внимание. В этой связи, в параграфе 4.3. для астатических объектов, описываемых дифференциальными уравнениями с нечеткими коэффициентами вида:

$$x^{(n)}(t) + \sum_{i=1}^{n-1} \tilde{b}_{n-i} x^{(i)}(t) = \tilde{k}_{ob} u(t),$$

разработана методика синтеза нечеткого регулятора, например с P и PD законами управления.

Методика формализации задачи синтеза и ее решения идентичны выше предложенным. В качестве примера для объекта порядка $n=2$ и нечеткого PD регулятора приведены результаты решения

задачи синтеза, т.е. интервальные значения качества - степени устойчивости J_{2np} и настроечного коэффициента \bar{k}_{0p}

$$\begin{aligned}
\bar{J}_{2np}^{PD} &= \left[(b_1^L + k_{ob}^L k_{1p}^L) / 2; (b_1^R + k_{ob}^R k_{1p}^R) / 2 \right], \\
\bar{k}_{0p}^{PD} &= \left[\frac{J_{2np}^L}{k_{ob}^L} \left(1 + \frac{1}{m_{ir}^2} \right); \frac{J_{2np}^R}{k_{ob}^R} \left(1 + \frac{1}{m_{ir}^2} \right) \right].
\end{aligned}$$

В пятой главе разработан метод синтеза нечетких регуляторов для двух типов объектов, описываемых нечеткими TS моделями с запаздывающим аргументом и без него.

Пусть объект, обладающий неопределенностью и запаздыванием, может быть представлен нижеследующей нечеткой TS (Takagi-Sugeno) моделью [6, 7, 10]:

OBR_j : ЕСЛИ состояние объекта x есть \tilde{X}_j И скорость изменения

состояния \dot{x} есть \tilde{X}_j , ТОГДА движение объекта описывается

уравнением

$$\sum_{i=1}^n a_{n-i}^j x^{(i)}(t) = k_{ob}^j u(t - \tau), \quad x^{(i)}(t) = \frac{d^i x(t)}{dt^i}, \quad x^{(0)}(t) = x(t), \quad j = \overline{1, q} \tag{38}$$

где τ -время запаздывания, которое является характерным свойством объекта.

Задачу синтеза управления можно сформулировать следующим образом.

Для объекта с запаздывающим аргументом, описываемый нечеткой TS моделью, требуется синтезировать структуру, базу знаний и параметры нечеткого регулятора

$$\begin{aligned}
\tilde{u}(t) &= \tilde{\varphi}(x, k_{ia}^j), \quad j \in [1, q] \\
k_{ia}^j &= (k_{i0}^j, k_{i1}^j \dots k_{im}^j), \quad m \leq n, \quad k_{ia}^j \in K,
\end{aligned} \tag{39}$$

так, чтобы переход объекта от начального $x(t_0) = x_0$ в конечное $x_s = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t)$ состояние соответствовал максимальной степени устойчивости и степени затухания колебаний переходного процесса системы управления (38), (39):

$$J_1^j = \max_{k_{ia} \in K} \left(-\operatorname{Re} \lambda(a^j, k_{ia}^j) \right), \quad j = \overline{1, q} \tag{40}$$

следовательно, характеристическое уравнение замкнутой системы управления не зависит от аргумента запаздывания. Поэтому параметры PID закона регулирования для j -го ЛП определяются из соответствующего характеристического уравнения $P_j(\lambda^j, k_r^j, a^j) = 0$ по выбранному распределению корней. Решается эта задача параметрического синтеза аналогично методологии, приведенной в главе 4.

Далее приведены аналитические выражения параметров настройки регулятора в зависимости от параметров объекта и от степени устойчивости системы управления.

$$J_1^j = \frac{1}{3a_0^j} (a_1^j + k_{ob}^j k_{T2}^j) ; \quad k_{T0}^j = \frac{a_0}{k_{ob}^j} (J_1^j)^3 \left(1 + \frac{1}{(m^j)^2} \right), \quad j = \overline{1, q},$$

$$k_{T1}^j = \frac{a_0 (J_1^j)^2 \left(3 + \frac{1}{(m^j)^2} \right) - a_2^j}{k_{ob}^j}$$

Следует отметить, что максимальная степень устойчивости системы J_1^j для каждого ЛП определяется предельным значением настроечного параметра PID регулятора- $k_{T2}^{jopt} = k_{T2}^* = K_{T2}^{max}$.

В параграфе 5.3 разработан аналитический метод синтеза нечеткого регулятора с TS моделью для нелинейного объекта - манипулятора робота с эластичным соединением.

Без учета сопротивления трения в пространстве состояний движение манипуляционного робота с эластичным соединением описывается в виде [29]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ - \left(a_{21} \frac{\sin x_1(t)}{x_1(t)} + a_{22} \right) x_1(t) + a_{23} x_3(t) \\ x_4(t) \\ a_{41} x_1(t) - a_{42} x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{41} \end{bmatrix} u(t)$$

Из математической модели видно, что относительно переменной x_1 имеется нелинейность. Учитывая эту нелинейную систему дифференциальных уравнений, объект можно представить нечеткой TS моделью вида:

OQSQ r : ЕСЛИ x_1 находится вблизи " $X_1 1^r$ ", ТОГДА

$$\dot{x}(t) = A_r x(t) + B_r u(t), r = \overline{1, q} \quad (43)$$

Путем логического рассуждения определяем, что каждому r лингвистическому правилу ЛП объекта (43) будет соответствовать управление $u_r(t)$:

TQSQ r : ЕСЛИ ", ТОГДА

$$u(t) = u^r(t) = -k_{1r} x_1 - k_{2r} x_2 - k_{3r} x_3 - k_{4r} x_4, r = \overline{1, q} \quad (44)$$

Учитывая модели объекта и регулятора, замкнутую систему управления можно представить в виде:

ЕСЛИ $x_1 1(t)$ находится вблизи " $X_1 1^r$ ",
ТОГДА $x^*(t) = (A_{1r} - B_{1r} K_{1r}) x(t) = D_{1r} x(t) \quad (45)$

$$D_{1r} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -a_{1r} & 2a_{1r} & -a_{1r} \end{bmatrix}$$

Задачи синтеза нечеткой САУ, т.е. регулятора можно сформулировать следующим образом.

Требуется синтезировать такой регулятор с нечеткой TS моделью, т.е. параметрами настройки $k_{jr} = \varphi_{jr}(A_r, J_r)$, чтобы переводя САУ из начального состояния $x(0)$ в конечное $x(T)$ состояние в системе (45) обеспечивалась возможная максимальная степень устойчивости и переходный процесс без перерегулирования:

$$J_r = \max\{-\text{Re}\lambda^*(A_r, B_r, k_r)\} \quad (46)$$

$$k_r \in K_r, \quad k_r > 0, r = \overline{1, q}, \quad K_r = \left([K_{1r}^{min}, K_{1r}^{max}], \dots, [K_{4r}^{min}, K_{4r}^{max}] \right)$$

Сформулированную задачу синтеза можно решить аналитически на основе распределения корней характеристического уравнения

системы (45) в каждом ЛП. Возможная максимальная степень устойчивости $J_{r \max}$ и параметров настройки k_{2r}, k_{3r}, k_{1r} для соответствующего лингвистического правила определяется на основе полученных аналитических выражений:

$$k_{13r} = ((6/J_{r \max})^2 - a_{141} - a_{121} a_{123} a_{1r}) / b, \quad r = \overline{1, q}$$

$$k_{12r} = [4/J_{r \max}^3 - b(a_{121} a_{1r} + a_{123}) k_{14}] / (b a_{123})$$

$$k_{11r} = [J_{r \max}^4 - a_{121} a_{141} a_{1r} - b(a_{121} a_{1r} + a_{123}) k_{13r}] / b$$

(47)

В шестой главе продемонстрированы применения разработанных методов синтеза нечетких регуляторов для управления объектами, обладающими различными типами неопределенностями, их испытания путем компьютерного моделирования в среде MATLAB.

Нечеткие регуляторы, синтезированные на основе предложений, приведенных в главах 4 и 5 диссертации, использованы для управления ряда технологических процессов и роботов, например для регулирования температурного режима ректификационной колонны в промышленной установке первичной переработки нефти, управления манипулятором робота с эластичным соединением. В результате проведенных исследований определено, что ректификационную колонну К-2 по каналу управления «острое орошение - температура верха» можно описать нечеткой TS моделью с двумя лингвистическими правилами (ЛП) и дифференциальным уравнением второго порядка с аргументом запаздывания в каждом ЛП. Параметры модели объекта имеют следующие значения:

при $r=1$: $d_1^1=0.5 \text{ мин.}^2$, $d_1^2=0.2 \text{ мин.}^2$, $a_2^2=1$, $\tau=0.1 \text{ мин.}$, $k_{ob}^1=5$;
 при $r=2$: $a_0^2=0.2$; $a_1^2=2$, $a_2^2=0.5$, $\tau=0.1$, $k_{ob}^2=1$.

Для этих значений параметров объекта, соответственно, определены значения настроенных коэффициентов нечеткого PID регулятора с РОС:

при $r=1$: $k_{T0}^1=510.9$; $k_{T1}^1=86.5$; $k_{T2}^1=5.06$; $r=2$: $k_{T0}^2=337.4$; $k_{T1}^2=81.9$;
 $k_{T2}^2=5.06$.

Составлена “S”-структурная схема системы управления температурой ректификационной колонны с нечетким регулятором с РОС на основе пакетов Simulink и Fuzzy Logic Toolbox в среде MATLAB и исполнена компьютерная симуляция. Ниже на рис.5

приведены результаты моделирования переходных процессов выхода $x(t)$, системы, ее производного $\dot{x}(t)$, управляющего воздействия $u(t)$ и фазовая траектория.

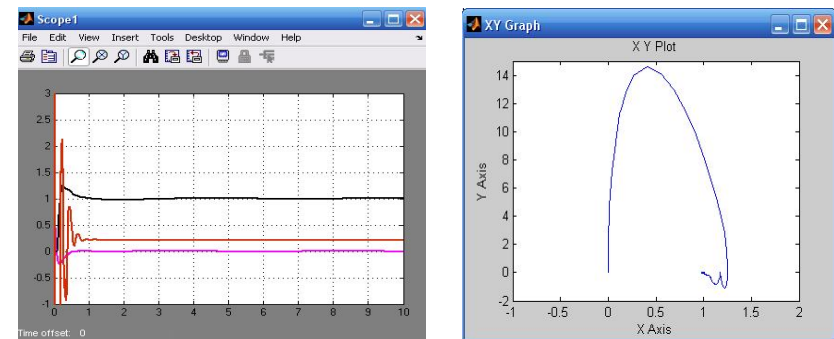


Рис. 5.

В параграфе 6.3 составлена «S-модель» для моделирования левого и правого частей интервала переходных процессов нечеткой системы управления, описываемой с нечетким дифференциальным уравнением второго порядка.

В параграфе 6.4. приведена техническая реализация нечеткого регулятора с TS моделью (который синтезирован на основе предложенного метода, изложенного в параграфе 5.3) для управления манипулятора робота с эластичным соединением. Осуществлено компьютерное моделирование в среде MATLAB. Параметры нелинейной модели манипулятора с эластичным соединением имеют следующие значения: $a_{21} = 0,0981$, $a_{22} = 0,05$, $a_{41} = a_{42} = 0,05$, $b_{41} = 1$

Нечеткий регулятор с TS моделью имеет две ЛП:

1Q : ЕСЛИ состояния системы x_1 « около $x_1^1 = 0$ », ТОГДА выход регулятора $u(t) = -(k_{11}x_1 + k_{21}x_2 + k_{31}x_3 + k_{41}x_4)$

$$\text{около } x_1^2 = \frac{\pi}{2}$$

2Q : ЕСЛИ состояния системы x_1 “ ”,
ТОГДА выход регулятора $u(t) = -(k_{12}x_{11} + k_{22}x_{22} + k_{32}x_{32} + k_{42}x_{42})$.

Отметим, что в значениях $x_1^1 = 0$ и $x_1^2 = \frac{\pi}{2}$ параметры модели будут иметь значения $a_1 = 1$ и $a_2 = \frac{2}{\pi}$. Функции принадлежности нечетких терм-множеств «около $x_1^1 = 0$ » и «около $x_1^2 = \frac{\pi}{2}$ » имеют треугольный вид.

Вычисленные оптимальные значения параметров настройки регулятора: $k_{\bullet} = 16$;

k_{31}	k_{32}	k_{21}	k_{22}	k_{11}	k_{12}
95.945	95.947	5074.01	5084.08	242.01	245.171

Для разработки “S-структур”ной схемы системы управления роботом сначала конструировано в виде подсистемы нечеткого регулятора с TS моделью (Fuzzy Logic Controller) на основе «Fuzzy Logic Toolbox», а затем «S-модель» системы управления путем интеграции пакетов Simulink и Fuzzy Logic Toolbox в среде MATLAB. Задав параметры “S-модели” системы управления, т.е. начальные значения x_1

интегрирующих блоков $x_1(0) = \pi/2$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = \pi/2$, $x_4(0) = 0$ и метод решения (интегрирования) - Ode4, шаг дискретизации - Step size - 0,005, время наблюдения эксперимента - 10, параметры объекта - усилители a_{ij}, b_{ij} ($i = 1,4, j = 1,4$) и коэффициенты настройки регулятора, осуществляется компьютерная симуляция.

Результаты компьютерного моделирования системы управления (с нечетким TS регулятором) роботом с эластичным соединением показали, что при переходе из начального состояния $(\pi/2, 0, \pi/2, 0)$ в

конечное состояние $(0, 0, 0, 0)$ в системе обеспечиваются требуемые высокие показатели качества, т.е. переходные процессы без перерегулирования.

В параграфе 6.5 разработана методика нечеткой идентификации при наблюдаемости лишь входного и выходного сигналов нелинейного объекта, обладающего нерегулярностью и хаотичностью движения. В предложенном методе для нечеткой идентификации входной и выходной сигналы нелинейного объекта подаются на специальные фильтры (динамические звенья), в которых наблюдаются все переменные состояния. На основе этих измерений состояний «входного и выходного» фильтров формируются матрицы наблюдений, а затем основываясь на МНК (метод наименьших квадратов) оцениваются параметры нечеткой TS модели объекта. Предложенная в диссертации методика идентификации применена для нелинейного объекта второго порядка. Результаты испытания показали удовлетворительность данной методики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного критического анализа научной литературы, посвященной состоянию методов синтеза и средствам систем управления объектами, обладающими различного типа нелинейностью и неопределенностью, определено, что либо в классе систем с переменной структурой, либо в классе только нечетких систем не могут быть обеспечены требуемые высокие качества управления. Кроме этого, методы синтеза нечетких регуляторов типа моделей Mamdani и TS (Tagaki-Sugeno) и средства их технически - программной реализации недостаточно разработаны.

2. Разработаны методы и средства построения различных типов нечетких регуляторов СПС Mamdani для управления объектов с неопределенностями, в том числе: а) для нестационарных объектов с неопределенностями предложена архитектура самонастраивающегося нечеткого регулятора и определены ее элементы, в частности, база знаний самоформирующейся линии скольжения и нечетких коэффициентов СПС (на основе расположения изображающей точки в фазовом пространстве); б) для многосвязных нелинейных объектов с неопределенностями предложена архитектура МНЧ регулятора СПС, определены БЗ (база знаний) нечетких коэффициентов СПС, количество терм-множеств и их функций принадлежности.

3. Определено, что математическую модель манипулятора робота PUMA, как многосвязного объекта автоматического управления, можно

описать многосвязными нелинейными дифференциальными уравнениями с нечеткими коэффициентами. Такая динамическая модель необходима при оценке качества и эффективности многосвязной нечеткой системы управления СПС роботом.

4. Для управления вторым и третьим соединением манипулятора робота PUMA разработана архитектура многосвязного нечеткого регулятора СПС и синтезированы его элементы: фаззификаторы, база знаний нечетких коэффициентов СПС, блок формирования плоскости скольжения (переключения). Разработанная МНЧ САУ СПС обладает более «высокой интеллектуальностью» сравнительно с обычными нечеткими системами и системой СПС, и тем самым имеет возможность обеспечить более высокие показатели качества управления.

5. В предложенной МИЧ САУ СПС движение манипулятора управляется под влиянием прямого действия момента T_{mi}^d и по ошибке, вследствие чего, обеспечиваются быстроедействие и динамическая точность САУ, а также ограниченное изменение значений при управлении. Экспериментально определено, что одним из преимуществ разработанной МНЧ САУ СПС манипулятором робота PUMA является то, что амплитуда изменения управления сравнительных обычных САУ СПС существенно мала.

6. Используя пакеты Fuzzy Logic Toolbox и Simulink разработаны технические программные средства реализации многосвязного нечеткого регулятора СПС в среде MATLAB. На основе этого осуществлена компьютерная симуляция МНЧ САУ СПС вторым и третьим соединением манипулятора и определено возможное эффективное время дискретизации $T_d = 0,005 \div 0,01$ секунд.

7. Компьютерная симуляция позволила уточнить функции принадлежности нечетких множеств переменных \tilde{e}_{ij} , \tilde{e}_{ij} и коэффициентов $\tilde{\alpha}_{ij}$, $\tilde{\beta}_{ij}$, их универсумов, а также подтвердила эффективность разработанной МИЧ САУ СПС.

8. Разработан метод аналитического синтеза параметров нечетких регуляторов с P или PD законами, позволяющий высококачественную, возможную максимальную степень устойчивости и затухания колебаний, управления динамическими объектами, описываемыми

нечеткими дифференциальными уравнениями с четкими коэффициентами.

9. Разработаны методы синтеза интервальных значений параметров различных типов нечетких регуляторов, с P, PD, PI и PID законами для высококачественных, например максимальной степени устойчивости и затухания колебаний переходного процесса, управление астатическими и неастатическими объектами, описываемыми дифференциальными уравнениями с нечеткими коэффициентами.

10. Предложена структура нечеткого регулятора с различными регулирующими обратными связями (РОС) для управления объектами, описываемыми нечеткими TS моделями с запаздывающим аргументом. Определены структура и база знаний фильтра обратной связи нечеткого регулятора с РОС.

11. Разработан метод параметрического синтеза регулятора в прямом контуре предложенного нечеткого регулятора с РОС, который обеспечивает возможные высокие показатели качества управления.

12. Разработан аналитический метод синтеза параметров нечеткого регулятора с TS моделью, обеспечивающий апериодический переходный процесс и возможную максимальную степень устойчивости системы управления нелинейным объектом - манипулятором робота с эластичным соединением, описываемым в пространстве состояний с нечеткой TS моделью.

13. Предложена методика нечеткой идентификации на основе лишь наблюдений входа-выхода нелинейного динамического объекта с хаотическим движением.

14. Проведенное в среде MATLAB компьютерное моделирование различных нечетких систем управления утвердило эффективность и достоверность разработанных в 4-й и 5-й главах диссертации методов синтеза нечетких регуляторов с TS моделью. Проведенные экспериментальные испытания показали, что эти САУ обладают максимальной устойчивостью и переходные процессы в них протекают почти без перерегулирования.

Синтезированные системы управления с различными нечеткими регуляторами, их технические реализации, компьютерное моделирование и применение в различных областях, например, в нефтепереработке и робототехнике, утвердили полученные научные результаты и практическую значимость диссертационной работы.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Книги:

1. Əliyev R.Ə., Cəfərov S.M., Babayev M.C., Zeynalov E.R., Qardaşova L.A. Qeyri müəyyənlik şəraitində qərarların qəbulu və idarəetmə. Bakı, Zaman-3, 2003, -214с.
2. Əliyev R.Ə., Cəfərov S.M., Babayev M.C., Zeynalov E.R., Hüseynov B.Q. Robot sistemlərində idarəetmə, Bakı, Nərgiz, 2004, -328s.
3. Zeynalov E.R. Müxtəlif tip qeyri-müəyyənliklərə malik obyektlərin intellektual idarəetmə sistemlərinin yaradılmasının üsul və vasitələri. Bakı, Təhsil işçisi nəşriyyatı, 2013.-322s.

Статьи:

4. Зейналов Э.Р. Методика построения обратимых аналоговых моделей осцилляторных нейронных сетей. Ученые записки АГНА. Баку, №5, 1993, с.137-144.
5. Джафаров С.М., Зейналов Э.Р. Синтез системы третьего порядка с максимально-предельной степенью затухания. Ученые записки АГНА. Баку, №3, 1994, с.137-141.
6. Зейналов Э.Р. Определение области настроечных параметров системы управления ректификационной колонной. Ученые записки АГНА. Баку, №3, 1994, с.142-146.
7. Зейналов Э.Р. Синтез системы третьего порядка с максимально-предельной степенью затухания. Просидинг Республиканской конференции молодых ученых и аспирантов. Баку, 1995, с.105.
8. Jafarov S.M., Zeynalov E.R., Zeynalova L.M., A synthesis of control system of object described by differential equations with fuzzy coefficients. Second International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing. Siegen, Germany. June 25-27, 1996. pp 97-101.
9. Джафаров С.М., Зейналов Э.Р. Исследование устойчивости нечеткой системы управления, представленной нечетким дифференциальным уравнением. Ученые записки АГНА. Баку, 1997, №2, с.56-63.
10. Зейналов Э.Р. Исследование устойчивости системы управления описываемой дифференциальных уравнением с нечеткими коэффициентами. Gənc alimlərin və aspirantların respublika konfrans tezisləri. Bakı 1997, 41-42 s.
11. Зейналов Э.Р. Выборы желаемого эталона для синтеза нечеткой системы управления. Aspirantların və gənc tədqiqatçıların respublika elmi konfrans materialları. Bakı, 11-12 fevral 1998, 186-187 s.

12. Jafarov S.M., Zeynalova L.M., Zeynalov E.R. and other. Intelligent control based on deferential equations. Third International Conference on Application of Fuzzy system and Soft Computing, Wiesbaden, Germany, October 5-7, 1998,p.243-249.
13. Jafarov S.M., Babayev M.J., Zeynalov E.R., Guseynov B.G., Mamedov V.M. Synthesis of control system of fuzzy systems multiconnected dynamic object in sliding with variable structure. First International Cinferece on Soft Computing With Word in System Analysis, Decision and Control-Antalya, Turkey, June 6-8, 2001, pp.243-247.
14. Jafarov S.M., Babayev M.J., Zeynalov E.R., Huseynov B.G., MamedovV.M. An approach to the synthesis of the Fuzzy Variable Structure Control System Providing of Fuzzy Systems and Soft Computing, Milan, Italy, September 17-18, 2002, pp.159-162.
15. Jafarov S.M., Babayev M.J., Guseynov B.G., Zeynalov E.R. Synthesis and modeling of the dynamic object with high fuzzyness-Puma type robots multilinked fuzzy system of controlwith variable structure. Second International Conference on Soft Computing and Computing with Words in System Analysis, Decision and Control. Antalya, Turkey, September 9-11, 2003, pp.161-171.
16. Jafarov S.M., Babayev M.J., Huseynov B.G., Zeynalov E.R. Projecting and analysis for the PUMA robot s multilinked fuzzy system of control with a variable structure. Journal «Knowledge» «Education» Society of Azerbaijan Republic 3, 2004, pp.10-21.
17. Cəfərov P.S., Zeynalov E.R., Cəfərov S.M. Qeyri-səlis diferensial tənliklə yazılan dinamik obyektin idarəetmə sisteminin sintezi. "Elm və təhsildə informasiya-kommunikasiya texnologiyalarının tətbiqi" II Beynəlxalq konfransın materialları. Bakı, 1-3 noyabr, 2007, 2-ci kitab, s. 755-760.
18. Zeynalov E.R., Jafarov P.S., Jafarov S.M. Synthesis of Fuzzy Controllers for Astatic Objects, Described by Differential Equations with Fuzzy Coefficients. Proceedings Fourth Intern. Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System. Antalya, Turkey, August 27-28, 2007, p. 316-324.
19. Джафаров П.С., Зейналов Э.Р., Джафаров С.М. Синтез нечетких регуляторов для астатических объектов, описываемых дифференциальными уравнениями с нечеткими коэффициентами. АМЕА-nın Xəbərləri. 2007, №2-3, 27-ci cild, s. 72-78.
20. Jafarov P.S., Zeynalov E.R., Jafarov S.M. Fuzzy controller's analytic synthesis and modeling for the objects with fuzzy dynamic models.

- Eighteens International Conference on Application of Fuzzy System and Soft Computing, Helsinki, Finland, September 1-3, 2008, p.290-295.
21. Jafarov P.S., Zeynalov E.R. Gecikməyə malik qeyri-səlis dinamik obyekt üçün müxtəlif tip tənzimlənmə əks əlaqəli idarəetmənin sintezi AMEA-nın Xəbərləri. 2008, №3, 28-ci cild, s. 89-94.
 22. Jafarov P.S., Zeynalov E. R. Analytic synthesis of control in dynamic systems with delay argument and fuzzy TS model. The second international conference "Problems of cybernetics and informatics". Baku, Azerbaijan, September 10-12, 2008, p.47-50.
 23. Джафаров П.С., Зейналов Э.Р., Джафаров С.М. Синтез нечетких системы автоматического регулирования с предельной максимальной степенью устойчивости и затухания. Azərbaycan Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri. 2008, № 5(57), s. 60-65.
 24. Cəfərov P.S., E.R. Zeynalov. TS modelli qeyri-səlis dinamik obyekt üçün optimal qeyri-səlis tənzimləyicinin analitik sintezi. Azərbaycan xalqının ümummilli lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 85 illiyinə həsr olunmuş "Texniki ali məktəblərdə təhsilin müasir problemləri" mövzusunda respublika elmi-praktiki konfransının materialları. Bakı, 2008, s. 99-100.
 25. Джафаров П.С., Зейналов Э.Р., Джафаров С.М. Аналитический метод синтеза автоматического управления объектом, описываемым нечетким дифференциальным уравнением с четкими коэффициентами. Кимевий технология назорат ва бошқарув (химическая технология, контроль и управление). Ташкент, 2009, №3, с.59-67.
 26. Jafarov P.S., Zeynalov E.R., Mustafayeva A.M. and oth. Identification of fuzzy models on nonlinear dynamic objects with observability of input and output. Fifth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control (ICSCCW-2009). Famagusta, North Cyprus, 2-4 September, 2009, p. 302-306.
 27. Jafarov P.S., Zeynalov E.R., Jafarov S.M. Design of control system described by fuzzy differential equation. Fifth ICSCCW-2009, Famagusta, North Cyprus, 2-4 September, 2009, p. 298-302.
 28. Jafarov P.S., Zeynalov E.R., Jafarov S.M., Mustafayeva A.M. The Analytical Method of Synthesis of a Controller with a Fuzzy TS model for Control of a Flexible Joint Robot Arm. Sixth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and

- Perceptions in System Analysis, Decision and Control. Turkey, Antalya, 1-2 September, 2011, p.107-113.
29. Нусратов О.К., Джафаров П.С., Зейналов Э.Р., и др. Аналитический метод синтеза регулятора с нечеткой TS моделью для управления нелинейным динамическим объектом – манипулятором робота с гибким соединением. Жур. Мехатроника, Автоматизация и Управление - Москва, 2011, №8, с.10-14.
 30. Джафаров С.М., Зейналов Э.Р., Джафаров П.С., Мустафаева А.М. Идентификация нечеткой модели нелинейных объектов при наблюдаемости лишь входа и выхода. Mingəçevir Politexnik İnstitutunun yaradılmasının 20-ci ildönümünə həsr olunmuş Respublika Elmi Konfransının materialları. Bakı-2011, s. 89-96.
 31. Cəfərov S.M., Zeynalov E.R., Cəfərov P.S. Elastik birləşməli robotun idarə edilməsi üçün qeyri-səlis TS tipli tənzimləyicinin sintezi. Mingəçevir Politexnik İnstitutunun yaradılmasının 20-ci ildönümünə həsr olunmuş Respublika Elmi Konfransının materialları. Bakı-2011, s. 81-88.
 32. Zeynalov E.R., Jafarov P.S., Jafarov S.M., Mustafayeva A.M. The methods of analytic synthesis of controllers for dynamic objects described by fuzzy differential equations. Tenth International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing Lisbon, Portugal, August 29-30, 2012, pp85-94.
 33. Zeynalov E.R., Mustafayeva A.M., Jafarov P.S., Jafarov S.M. Design of a system of an automated synthesis of controllers on the base of the chaos theory. Seventh International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control. Turkey, Izmir, 1-2 September, 2013, pp.395-403.
 34. Zeynalov E.R., Cəfərov P.S., Mustafayeva A.M., Cəfərov S.M. Xaotik hərəkətli fasiləsiz qeyri-xətti idarəetmə obyektinin giriş-çıxış müşahidələri əsasında qeyri-səlis modelinin təyini AMEA Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, 2013, №3, с.38-43.
 35. Зейналов Э.Р., Мустафаева А.М., Джафаров П.С., Джафаров С.М. Проектирование системы автоматизированного синтеза регулятора в САУ на основе теории хаоса. AMEA Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, 2013, №6, s.139-146.
 36. Zeynalov E.R. Müxtəlif tip qeyri-səlis diferensial tənliklərlə yazılan dinamik obyektlər üçün tənzimləyicilərin sintezi üsullarının işlənməsi. AMEA Azərbaycan MEA-nın Xəbərləri, 2013, №6, s.78-89.

37. Zeynalov E.R., Jafarov P.S. A method to the analytic synthesis for fuzzy controller's in the objects with delay argument. An International Journal "APPLIED AND COMPUTATIONAL MATHEMATICS" V.13, N.2, pp.257-265.

Личный вклад соискателя в работах, которые опубликованы в соавторстве

Во всех совместно опубликованных работах [5,8,9,12-35,37] постановка задач, разработка моделей и методов синтеза регуляторов и анализ результатов выполнены соискателем.

ELÇİN RAZİM oğlu ZEYNALOV

Müxtəlif tip qeyri-müəyyənlikli modellərlə yazılan dinamik obyektlər üçün qeyri-səlis tənzimləyicilərin sintezi üsullarının işlənməsi

Bir sıra texnoloji proseslər və manipulyasiyalı robotlar idarəetmə obyekti kimi müxtəlif tip qeyri-müəyyənlikli modellərlə yazılırlar. Ona görə də təqdim olunan işin məqsədi müxtəlif tip qeyri-müəyyənlikli modellərlə

yazılan dinamik obyektlərin yüksək keyfiyyət göstəricili idarəetməsini təmin etmək üçün qeyri-səlis tənzimləyicilərin strukturunun, biliklər bazasının, parametrik sintezi üsullarının işlənməsi və onların modelləşdirilməsi vasitələrinin işlənməsidir.

Bu məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı **məsələlər** həll olunmuşdur.

- Qeyri stasionar obyektlərin idarə olunması üçün özəsaslanan qeyri-səlis dəyişən strukturlu (QDS) tənzimləyici konstruksiya edilmişdir.
- Manipulyasiyalı robotların yüksək keyfiyyət göstəricili idarəetməsini təmin edən çoxəlaqəli QDS tənzimləyicinin struktur və parametrik sintezi üsulu işlənməmişdir.
- Çoxəlaqəli QDS tənzimləyicinin proqram realizasiyası işlənməmişdir. Bu da çoxəlaqəli qeyri-səlis dəyişən strukturlu AİS-in MATLAB mühitində kompüter modelləşdirməsinə imkan verir.
- Müxtəlif tip qeyri-səlis diferensial tənliklərlə yazılan obyektlər üçün müxtəlif strukturlu qeyri-səlis Pİ-, PİD-, P- və PD- qanunlu tənzimləyicilərin parametrlərinin sintezi üsulları işlənməmişdir.
- Müxtəlif tənzimlənən əks əlaqəli (MTƏƏ) qeyri-səlis TS modeli tənzimləyicinin strukturunu və biliklər bazası konstruksiya edilmişdir.
- TS (Tagaki-Sugeno) tipli qeyri-səlis modellə yazılan gecikmə argumentli obyektlər üçün MTƏƏ qeyri-səlis tənzimləyicilərin analitik sintezi üsulu işlənməmişdir.
- Elastik birləşməli robotun əlinin idarəedilməsi üçün TS tipli qeyri-səlis modellə yazılan tənzimləyicinin analitik sintezi üsulu işlənməmişdir.
- Qeyri-səlis AİS-in və identifikasiya sistemlərinin MATLAB mühitində proqram realizasiyalarının vasitələri işlənməmişdir.

Dissertasiyada alınmış elmi yeniliklər bilavasitə rektifikasiya kolonunun temperaturunun AİS-in, PUMA robotunun və elastik birləşməli robotun əlinin idarəetmə sistemlərinin aparılmış sınaq eksperimentləri əsasında təsdiq edilmişdir.

ZEYNALOV E.R.

Development of methods of fuzzy controllers design for dynamical objects described by models with different types of uncertainty

SUMMARY

A series of technological processes and manipulators as control objects are described by mathematical models with various types of uncertainty. In view of this,

the purpose of the research is a development of methods and tools of fuzzy controllers design: design of structures, knowledge bases and parameters of controllers described by fuzzy models of various types.

The following problems were solved in order to achieve the purpose of the research:

- Variable structure fuzzy self-adjusting controllers for non-stationary objects are designed;
- A method of structural and parametric synthesis of multivariable variable structure fuzzy controller for high-performance control of PUMA manipulator;
- A tool for software implementation of variable structure multivariable fuzzy controllers which allows for computer modeling of fuzzy control systems in MATLAB environment;
- Methods of analytical synthesis of various fuzzy P/PI/PID controllers for objects described by fuzzy differential equations with crisp and fuzzy coefficients;
- Various structures for tuned feedback and knowledge bases of Takagi-Sugeno (TS) fuzzy controller are designed;
- A method is developed for analytical synthesis of parameters of a TS fuzzy controller with various tuned feedbacks for objects with time delay described by TS fuzzy models;
- A method is developed for analytical synthesis of TS fuzzy controller for control of a flexible robot arm;
- A tool for software implementation of the designed fuzzy control systems and model identification systems in MATLAB is developed.

The results obtained in the research work are confirmed by experimental investigations of the designed fuzzy control systems: fuzzy control system of temperature of a top section of rectifying column at a technological process of primary oil refining; fuzzy control system for PUMA; fuzzy control system of flexible manipulator arm.

ELÇİN RAZİM OĞLU ZEYNALOV

**MÜXTƏLİF TİP QEYRİ-MÜƏYYƏNLİKLİ MODELƏRLƏ
YAZILAN DİNAMİK OBYEKTlər ÜÇÜN QEYRİ – SƏLİS
TƏNZİMLƏYİCİLƏRİN SİNTEZİ ÜSULLARININ İŞLƏNMƏSİ**

1203.01-Kompüter elmləri

Texnika elmləri doktoru alimlik dərəcəsi
almaq üçün təqdim olunmuş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2014