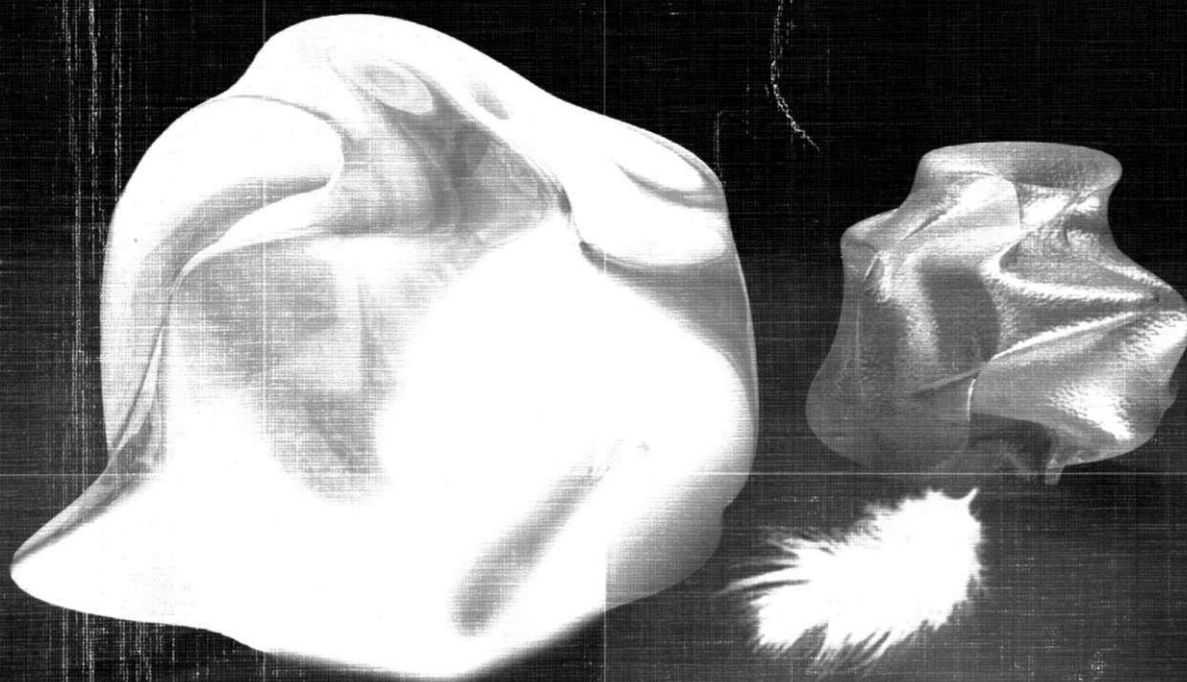


Том 3, № 2, Июнь 2008

ISSN 1819-4362

НЕЧЕТКИЕ СИСТЕМЫ И МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ



Научный журнал Российской ассоциации
нечетких систем и мягких вычислений

**РОБАСТНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ: СИСТЕМНЫЙ И СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ****Ульянов С.В.**

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

Поступила в редакцию 15.03.2008.

В статье проведен структурный анализ интеллектуальных систем управления (ИСУ) и описаны взаимосвязи с традиционными задачами теории систем управления. На основе анализа результатов моделирования типовых структур ИСУ показано, что применение нечёткой нейронной сети (ННС) не гарантирует (в общем случае) достижение требуемой точности аппроксимации обучающего сигнала (ОС), полученного от генетического алгоритма (ГА) и расположенного в контуре интеллектуальной глобальной обратной связи (ИГОС) структуры ИСУ. В результате, при существенном изменении внешних условий повышается уровень чувствительности объекта управления (ОУ), что приводит в целом к снижению робастности ИСУ и как следствие, к потере надёжности (точности) достижения поставленной цели управления. Рассматривается применение новых видов интеллектуальных вычислений для решения задачи повышения робастности ИСУ.

In the article the structure analysis of intelligent control systems (ICS) is developed and interrelations with conventional tasks of control system theory are described. Using the simulation analysis results of ICS typical structures is shown that applications of fuzzy neural network is not guarantee (in general case) the achievement of the required accuracy in an approximation of a teaching signal that generated by genetic algorithm (GA) in the intelligent global feedback (IGF) of control loop. As result, in dramatically exchanging of external conditions the sensitivity of control object is increased and the robustness of ICS is decreased. Thus reliability of the control goal achievement by ICS is loosed. Applications of new types of computational intelligence toolkit for solutions of ICS robustness problem are discussed.

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, робастность, структурный анализ.

Keywords: intelligent control systems, robustness, structure analysis.

Введение

Инженерные методы теории управления и технологии проектирования систем автоматического управления (САУ) были созданы и сформированы в прошлом столетии. Большой вклад в становление данного направления внесли научные школы Б.Н. Петрова, С.В. Емельянова, Е.А. Федосова, А.А. Красовского, И.М.

Макарова, Я.З. Цыпкина, А.А. Первозванского, И.Е. Казакова, А.М. Лётова, Н.Н. Красовского, Р.А. Алиева и мн. др. Были заложены, в частности, основы стохастического и адаптивного управления сложными динамическими системами (в общем случае, с переменной структурой - СПС) в условиях информационной неопределенности.

Следующим шагом в этом направлении была разработка принципов моделирования и систем проектирования нечетких САУ в условиях неопределенности, учитывающая индивидуальные особенности поведения выборочных траекторий движения объекта управления (ОУ) [1, 2]. За основу данной методологии проектирования была принята теория лингвистической аппроксимации и нечеткого вывода (Л. Заде и др.) для создания робастных БЗ интеллектуальных нечетких регуляторов (НР).

В рамках разработанной школой Б.Н. Петрова методологии проектирования законов управления на основе физических методов (информационно-термодинамические и квантово-релятивистские методы описания ОУ и процессов управления [3]) в середине семидесятых годов прошлого столетия были заложены основы проектирования интеллектуальных САУ (ИСУ) [1, 4].

Основное внимание в данной статье сконцентрировано на описании конкретных структур ИСУ сложными, существенно-нелинейными объектами управления со случайно изменяющейся структурой и изменяющимися задающими сигналами (целями управления). Основной целью работы в этом случае является выявление уровней робастности процессов управления, поддерживающих требуемый уровень надёжности и точности процессов управления в условиях неопределённости информации в процессах принятия решений.

С этой целью рассмотрим, прежде всего, эволюцию типовых структур ИСУ, их особенности, достоинства и недостатки с точки зрения технологии проектирования и применения ИСУ.

1. Особенности технологии проектирования и эволюция структур робастных ИСУ

Одна из основных задач технологии проектирования ИСУ заключается в том, чтобы разработанная (выбранная) структура обладала требуемым уровнем качества управления, заданным уровнем робастности, а спроектированный уровень качества управления был оптимальным (поддерживал требуемый уровень надёжности и точности управления в условиях неопределённости информации). При этом одной из приоритетных и трудно решаемых задач технологии проектирования ИСУ является построение робастных БЗ, позволяющих функционировать ИСУ в различных условиях неопределённости информации [5]. Ядро технологии проектирования робастных БЗ НР составляют новые типы вычислений и процессов моделирования [6, 7]. Использование структур ИСУ, основанных на новых типах вычислений (таких как мягкие вычисления, квантовые вычисления и т.п.), в последние годы привлекает все большее внимание исследователей [2, 7, 8]. Проведенные многочисленные исследования показывают, что они обладают следующими достоинствами: сохраняют основные преимущества традиционных систем управления (такие как устойчивость, управляемость, наблюдаемость и т.п.), что составляет основу для технологии проектирования ИСУ; имеют оптимальную (с точки зрения заданного критерия качества управления) БЗ, а также возможность её коррекции и адаптации к изменяющейся ситуации управления;

гарантируют достижимость требуемого качества управления на основе спроектированной БЗ; являются открытыми системами, то есть позволяют вводить дополнительные критерии качества управления и ограничения на качественные характеристики процесса управления.

Одной из основных задач современной теории управления является разработка и проектирование САУ, отвечающих трём основным качествам управления: *устойчивость, управляемость и робастность*. Перечисленные качества управления обеспечивают требуемую точность управления и надёжность работы ОУ в условиях неполной информации о внешних возмущениях и помехах в каналах измерения и управления, неопределённости структуры или параметров ОУ или слабо формализованных факторов, описывающих цели управления.

Решение данной задачи осуществляется в три этапа: (1) Определяются условия устойчивости ОУ при фиксированных условиях его работы во внешней среде; (2) Формируется закон управления, обеспечивающий устойчивость работы ОУ при заданной точности управления (по заданному критерию оптимального управления); (3) Проверяется чувствительность динамического поведения ОУ на разные классы случайных возмущений и помех.

Данные этапы проектирования рассматриваются современной теорией управления, как относительно независимые, и основной проблемой проектирования САУ является определение оптимального взаимоотношения между этими тремя качествами управления.

Рассмотрим конкретный пример структурного моделирования взаимосвязи указанных выше эталов проектирования на нижнем (исполнительном) уровне САУ.

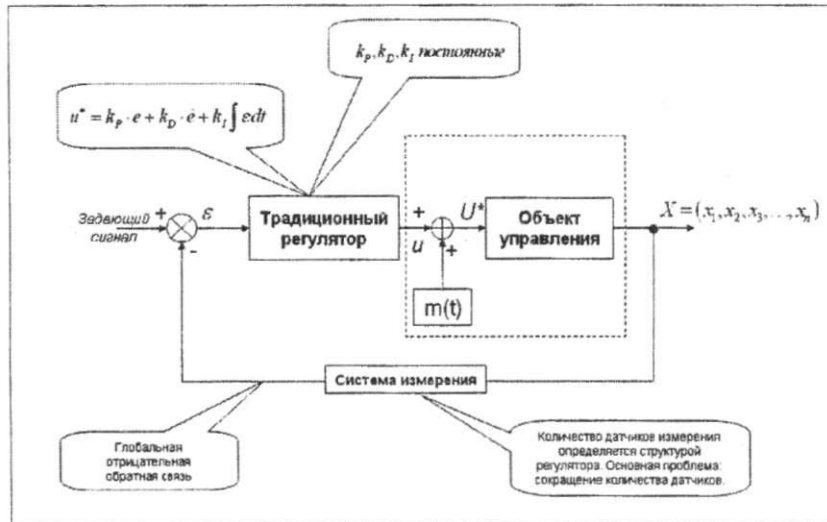
Пример 1. Как известно, основной принцип построения САУ использует биологический механизм глобальной, отрицательной обратной связи (ГООС). На рис. 1 показана традиционная САУ, основанная на принципе ГООС (см. также позицию 1, Таблица 1). В соответствии с законами автоматического регулирования и теории управления, отношение между выходом линейного динамического ОУ и задающим сигналом (цели управления), определяется следующим уравнением:

$$X(i\omega) = \frac{1}{\underbrace{1 + \Phi_1(i\omega)\Phi_2(i\omega)}_{\text{Устойчивость}}} \cdot \underbrace{\Phi_1(i\omega)\Phi_2(i\omega) \cdot Y(i\omega)}_{\text{Управляемость}}, \quad (1)$$

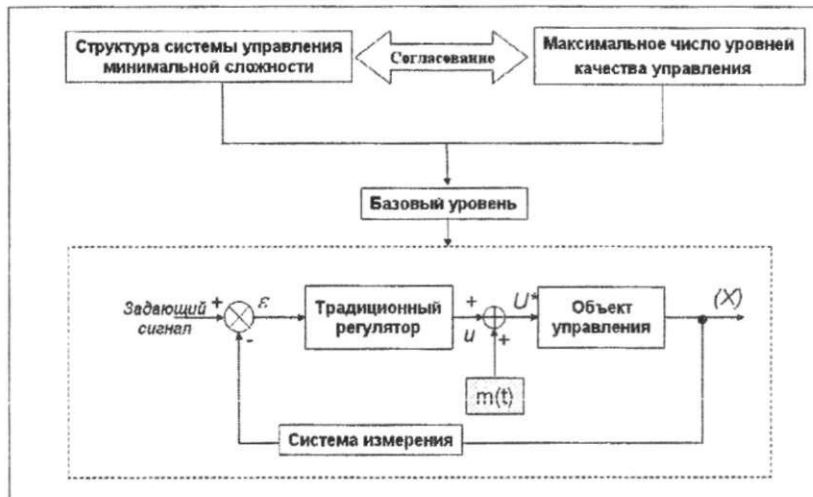
где $\Phi_1(i\omega)$ - передаточная функция регулятора, $\Phi_2(i\omega)$ - передаточная функция ОУ, Y – задающий сигнал, X – выходной сигнал ОУ. Нетрудно видеть, что формула (1), описывающая отношение вход/выход в структуре САУ, требует исследования одновременно двух критериев качества управления: *устойчивость и управляемость*.

Следовательно принцип ГООС содержит в себе два указанных выше критерия качества управления. Именно поэтому робастность рассматривалась как независимый критерий качества управления, проектирование которого осуществлялось после установления уровней устойчивости и управляемости.

Приведенный пример одновременно указывает на жёсткость структуры САУ, для которой в процессе проектирования трудно установить уровень интеллектуальности и, как следствие, уровень робастности.



а) Структура САУ с ПИД-регулятором и её основные динамические характеристики.



б) Взаимоотношения между качественными характеристиками и сложностью процессов управления (приведены соотношения между уровнями качества управления, сложности управления, и обоснование базового уровня).

Рис. 1: Структура САУ, основанной на принципе глобальной отрицательной связи и методе компенсации (минимума) ошибки управления (ПИД-регулятор).

Для робастных структур САУ может быть доказан физический принцип управления, позволяющий объединить и найти в аналитическом виде соответствие между требуемым уровнем устойчивости, управляемости и робастности управления [1, 7, 8]. Это позволяет определить необходимый уровень интеллектуальности САУ в зависимости от сложности конкретной проблемы управления.

Пример 2. Кратко рассмотрим основные физические принципы процессов управления, позволяющие устанавливать взаимосвязь между качественными характеристиками динамического поведения ОУ и исполнительным устройством САУ: устойчивостью, управляемостью и робастностью управления. Для этой цели используем информационный и термодинамический подходы, объединяющие однородным условием критерии динамической устойчивости (функция Ляпунова), управляемости и робастности [7]. Рассмотрим динамический ОУ, описываемый (в общем виде) уравнением

$$\frac{dq}{dt} = \varphi(q, t, u), \quad (2)$$

где q - вектор обобщенных координат, описывающий динамическое поведение ОУ, u - управляющая сила (выход исполнительного устройства САУ), t - время.

Необходимые и достаточные условия асимптотической устойчивости динамической системы, описываемой уравнением (2), определяются физическими ограничениями на вид функции Ляпунова, которая имеет два важных свойства: строго положительная функция от обобщенных координат, $V > 0$ (условие 1), полная производная по времени от функции Ляпунова является неположительной функцией, $\frac{dV}{dt} \leq 0$ (условие 2).

Согласно условиям (1) и (2) в качестве обобщенной функции Ляпунова выберем следующую функцию [7]:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i^2 + \frac{1}{2} S^2, \quad (3)$$

где $S = S_p - S_c$ - производство энтропии в открытой системе «+ регулятор»; S_p - производство энтропии в ОУ, S_c - производство энтропии в регуляторе (в исполнительном устройстве САУ).

Введение энтропийных характеристик в уравнение (3) возможно в силу скалярного свойства энтропии как функции времени, $S(t)$ [8].

Первое условие выполняется автоматически. Потребуем выполнения второго условия, $\frac{dV}{dt} \leq 0$. В этом случае полная производная от функции Ляпунова, описанной в (3), имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{1}{2} \sum 2\dot{q}_i q_i + \frac{1}{2} 2S \cdot \dot{S} = \sum_{i=1}^n \dot{q}_i q_i + S\dot{S} = \\ &= \sum_{i=1}^n q_i \cdot \varphi(q, t, u) + (S_p - S_c) (\dot{S}_p - \dot{S}_c). \end{aligned}$$

Таким образом, учитывая соотношение (2), имеем

$$\underbrace{\frac{dV}{dt}}_{\text{стабильность}} = \underbrace{\sum_{i=1}^n q_i \cdot \varphi(q, t, u)}_{\text{управляемость}} + \underbrace{(S_p - S_c) \cdot (\dot{S}_p - \dot{S}_c)}_{\text{робастность}} \leq 0 \quad (4)$$

На рис. 2 показана взаимосвязь между функцией Ляпунова и производством энтропии в ОУ и в САУ.

Замкнутая динамическая система	Открытая динамическая система
$\frac{dW'}{dt} = -\frac{1}{T} \frac{dS_P}{dt}$	$0 > \frac{dW'}{dt} = \underbrace{\sum_i q_i \varphi(q_i, u, t)}_{\text{Условие Устойчивости}} + \underbrace{(S_P - S_C)}_{\text{Часть механического движения (Управляемость)}} \left(\underbrace{\frac{dS_P}{dt} - \frac{dS_C}{dt}}_{\text{Часть термодинамического поведения (Робастность)}} \right)$

Рис. 2: Взаимосвязь между функцией Ляпунова и производством энтропии в объекте управления и системе управления.

Уравнение (4) описывает физический закон качества управления и объединяет в аналитической форме различные меры качества управления типа: *устойчивость*, *управляемость* и *робастность*, поддерживающие требуемую надёжность и точность управления.

Следовательно, взаимосвязь между устойчивостью по Ляпунову и робастностью, описанной уравнением (4), является основным физическим законом для проектирования САУ. Этот закон является основой для прикладной технологии проектирования БЗ робастных ИСУ (с различными уровнями интеллектуальности [9 - 11]) с использованием технологий мягких вычислений.

Примечание. Практическое применение физического закона процессов управления (4) к традиционным задачам, таким как оценки точности (грубости) линеаризации моделей ОУ, наблюдаемости параметров процессов управления и др., рассмотрено в [1]. Здесь отметим, что член $\sum_i q_i \dot{q}_i$ характеризует дополнительную возможность работы с физической моделью ОУ без применения математической модели, используя непосредственно измерение динамического поведения ОУ. В этом случае имеем обобщение модели «чёрного ящика» ОУ.

В заключение данного параграфа сделаем следующие выводы:

1. Введенный физический закон интеллектуального управления (4) определяет основы процессов проектирования робастных БЗ ИСУ (с различными уровнями интеллектуальности), основанных на технологии мягких вычислений.
2. Технологии мягких вычислений создают возможность разработать универсальный «аппроксиматор» в виде нечёткой САУ, который извлекает информацию из данных моделирования динамического поведения ОУ и исполнительного устройства в самой САУ.

3. Использование технологии мягких вычислений гарантирует целенаправленное проектирование соответствующего уровня робастности за счёт оптимального проектирования общего количества продукционных правил и типов функций принадлежности в БЗ [11].

На рис. 3 и 4 показаны типовые критерии качества управления, их взаимоотношение с различными видами вычислений и типами моделирования, а также иерархия уровней качества управления в зависимости от требуемого уровня интеллектуальности САУ.

На рис. 5 показаны основные компоненты и их взаимосвязи в информационной технологии проектирования (ИТП), основанной на новых видах вычислений (мягких и квантовых вычислениях).



Рис. 3: Взаимоотношение между типами и иерархическими уровнями критериев качества.

Ключевым пунктом данной ИТП является использование метода извлечения объективного знания о процессе управления независимо от субъективного опыта экспертов и проектирование объективных БЗ НР [10, 11], являющихся главной составной частью робастной ИСУ. Выходным результатом применения данной ИТП является робастная БЗ НР, позволяющая ИСУ функционировать при различных видах и типах информационной неопределённости.

2. Структурный анализ ИСУ

Задачи управления существенно нелинейными и глобально неустойчивыми ОУ исследовались при наличии различных типов стохастического возмущения

на ОУ (в качестве ОУ использовалось множество типовых существенно нелинейных осцилляторов). С помощью разработанной системы стохастического моделирования определялись предельные возможности классических САУ, основанных на использовании исполнительного устройства САУ в виде традиционного ПИД-регулятора (см. Таблицу 1, позиция 1).



Рис. 4: Взаимоотношение между критериями качества управления, видами интеллектуальных вычислений и моделирования в технологии проектирования робастных БЗ НР.

В результате проведенного исследования был установлен следующий факт: классические САУ, основанные на ПИД-регуляторе с постоянными коэффициентами усиления, часто не справляются с задачей управления в случае глобально неустойчивых и существенно-нелинейных ОУ, находящихся под воздействием негауссовского (например, Рэлеевского) стохастического шума, а также в условиях временных задержек в каналах измерения.

Этот факт объясняется следующими обстоятельствами. Классические САУ основаны на принципе ГООС и методе компенсации ошибки управления. Однако в сложных ОУ (упомянутых выше) недостаточно иметь результат оптимизации только по одному критерию качества управления, типа минимума ошибки управления. Поэтому на практике проектирования ИСУ сложными ОУ возникает следующая проблема: *как ввести в систему управления другие, дополнительные критерии качества управления?*

К таким критериям относятся, например минимум производства энтропии в ОУ, и/или минимум производства энтропии в самой системе управления (учитыв-

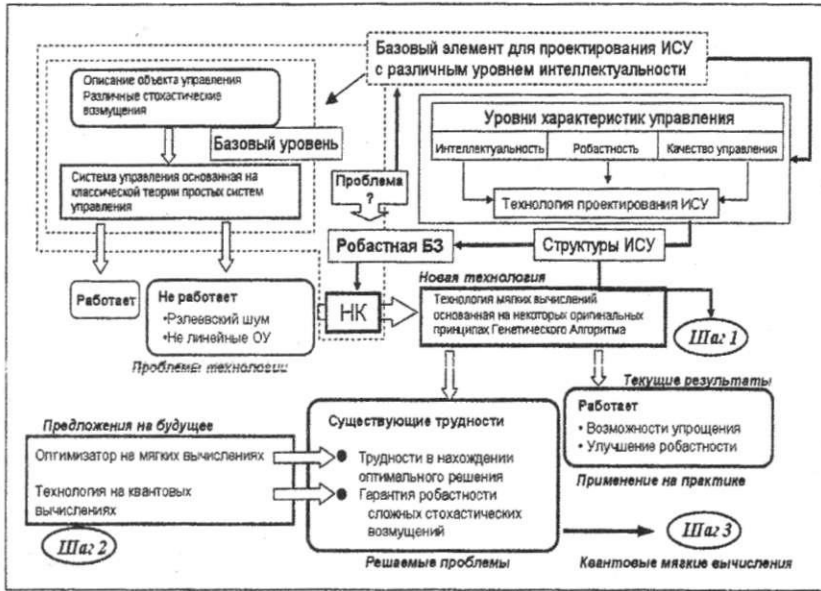


Рис. 5: Процесс разработки и создания информационной технологии проектирования интегрированной интеллектуальной системы управления.

вающие тепловые потери, потери полезной работы в объекте и системе управления), или другие более сложные, векторные критерии качества управления.

Примечание. Подобные и смежные вопросы построения физической теории управления рассматривались в работах А.А. Красовского, Ю.И. Самойленко, С.В. Емельянова, А.Г. Бутковского, Л.И. Розоноэра, Р. Поплавского, А.М. Цирлина А.П. Фрадкова и мн. др. В данной статье мы ограничиваемся рассмотрением взаимоотношений между уровнями качества законов управления на основе соотношений (4). Отметим, что разрешить этот вопрос с помощью процесса проектирования стандартного ПИД-регулятора с постоянными коэффициентами усиления практически невозможно.

Ограниченные возможности по реализации сложных критериев качества управления в классических САУ, особенно в указанных выше случаях управления, послужили отправной точкой к развитию ИСУ, основанных на идеях близких к использованию стратегий управления, используемых человеком-экспертом в сложных ситуациях.

2.1. Поколения и эволюция типовых структур ИСУ

В таблице 1 приведена обобщённая эволюция развития и формирования структур ИСУ, их особенности, достоинства и недостатки, а также уровни качества управления, содержащиеся в этих структурах. Для моделирования «человеко-машинных» стратегий управления на первом этапе стали использоваться так называемые «мягкие вычисления», в основе которых лежит теория нечетких множеств и нечеткого вывода [1, 2].

Так, например, представленная на рис. 1 структура преобразуется в экспертную систему управления последовательным наращиванием составляющих блоков

в классической структуре САУ (в данном случае введением блока нечеткого вывода), (см. Таблица 1, позиция 2) [4], и является примером первого поколения ИСУ.

Таким образом, первое поколение ИСУ представляло собой нечеткие экспертные системы (ЭС) с различными по глубине представлениями знаний. Основную роль в этих ЭС играло качество БЗ, которое зависит от опыта и субъективных знаний человека-эксперта.

Однако, в случае управления глобально неустойчивыми и существенно нелинейными ОУ, находящимися под воздействием сложных стохастических шумов, даже опытному человеку-эксперту трудно подобрать оптимальную (с точки зрения качества управления) БЗ НР.

Эта проблема - узкое место всех первых (и их последующих модификаций) ИСУ [2]. Поэтому использование ЭС в качестве инструментария извлечения знаний и формирования БЗ (как основы технологии проектирования ИСУ) не привело к ожидаемому существенному успеху (хотя существует много примеров промышленного внедрения [4]) в силу сложности ОУ и субъективности информации, вносимой экспертом. С точки зрения технологии проектирования основной проблемой внедрения ИСУ первого поколения являлась их слабая адаптивность к изменениям параметров ОУ (вызванных, например, старением структуры ОУ или резким изменением внешней среды), а также низкая робастность полученных законов управления.

Для решения подобных проблем были разработаны ИСУ второго поколения с глубинным представлением знаний, использующие технологии мягких вычислений, объединяющие в единую цепочку «ГА - ННС - НР». Это позволило исключить субъективное мнение эксперта на этапе формирования структуры и параметров БЗ НР

В свою очередь развитие ИСУ, основанных на мягких вычислениях, породило несколько подходов к формированию структур БЗ. Первоначально планировалось формировать некоторый достаточно огрубленный обучающий сигнал (ОС) от ГА и извлекать БЗ путем аппроксимации полученного ОС на ННС. Структура ИСУ второго поколения представлена путем введения в структуру ИСУ первого поколения блока, включающего в себя ГА и ННС (см. Таблицу 1, позиция 3).

В дальнейшем второе поколение ИСУ стало использовать новый вид обратной связи, называемой ИГОС [10 - 12], представленной в Таблице 1 (позиция 4). Ее использование дает возможность извлекать объективные знания непосредственно из самого динамического поведения ОУ и исполнительного устройства САУ. Контур ИГОС включает ГА для получения информации об оптимальном сигнале управления (исходя из динамического и термодинамического поведения самого ОУ и ПИД-регулятора) и ННС, аппроксимирующей данный оптимальный сигнал управления с помощью заданной структуры нейронной сети.

Основным блоком в структуре ИСУ (см. Таблица 1, позиция 5) является система моделирования оптимального сигнала управления (СМОСУ) с помощью ГА и критерия качества управления, заданного в виде одной из составляющих вектор-функции пригодности ГА. Выходом СМОСУ является ОС (оптимального управления) в виде следующих входных/выходных данных: $\{E(t_i), K(t_i)\}$, $i = 1, \dots, n$, где $E(t_i) = \{e(t_i), \dot{e}(t_i), \int e(t_i) dt_i\}$ - вектор, компонентами которого являются ошибка управления, ее производная и интеграл ошибки соответственно, $K(t_i) = \{k_p(t_i), k_d(t_i), k_i(t_i)\}$ - оптимальные (с точки зрения заданной функции пригодности ГА) параметры ПИД-регулятора; t_i - момент времени.

Таблица 1: Эволюция процесса проектирования структур робастных ИСУ, основанных на знаниях, и взаимосвязь с классической теорией управления.

Структуры систем управления и Эволюция развития 1	Уровни качества управления 2	Преимущества 3	Предельные возможности 4
<p>Базовый элемент САУ</p>	<p>Устойчивость Управляемость Точность управления</p>	<ul style="list-style-type: none"> - простота моделирования и физической реализации (низкая сложность); - простота при НЧ реализации; - при минимальной сложности ОУ, минимально обеспечивает устойчивость и управляемость; - гарантирует необходимые условия качества управления, но недостаточные. 	<ul style="list-style-type: none"> - при изменении внешних условий или сложности ОУ не обеспечивает достаточные условия устойчивости и управляемости (отсутствие требуемого уровня робастности); - жесткая (неадаптивная) структура; - не обладает способностью к обучению и самоорганизации.
Интеллектуальные системы управления, основанные на знаниях			
<p>Базовый элемент ИСУ</p>	<p>Устойчивость Управляемость Точность управления Частичная адаптация</p>	<ul style="list-style-type: none"> - простота и эффективность управления сложными ОУ; - легко проектируется и реализуется современными технологиями СБИС; - высокая надежность в эксплуатации; - используется в построении робастных БЗ. 	<ul style="list-style-type: none"> - выбор функции принадлежности зависит от уровня квалификации эксперта; - имеет ограниченные возможности в практической реализации из-за ограничений на описание нечетких отношений «вход – выход»; - проблема сложности проектирования БЗ ИСУ, т.к. отсутствует конструктивный алгоритм формирования БЗ; - требует большого количества времени для построения логических правил нечеткого вывода.
<p>Блок извлечения знаний и формирования БЗ</p>	<p>Устойчивость Управляемость Точность управления Адаптация</p>	<ul style="list-style-type: none"> - позволяет частично исправить недостатки базового уровня ИСУ и достигнуть требуемого уровня адаптации в фиксированных условиях функционирования ОУ. 	<ul style="list-style-type: none"> - не обладает достаточной робастностью и устойчивостью; - использует информацию об ошибке управления и не использует информацию о динамическом поведении ИСУ и ОУ.
<p>Интеллектуальная обратная связь</p>	<p>Устойчивость Управляемость Точность управления Адаптация Обучение Частичная самоорганизация</p>	<ul style="list-style-type: none"> - обратная интеллектуальная связь позволяет извлекать объективные знания и построить БЗ ИСУ; - позволяет охватить новый уровень качества управления (частичная самоорганизация). 	<ul style="list-style-type: none"> - ИСУ не гарантирует требуемую точность аппроксимации обучающего сигнала с выхода ГА; - при резком изменении внешних условий повышает чувствительность ОУ (снижает робастность).
<p>Оптимизатор БЗ на языке вычислений</p>	<p>Устойчивость Управляемость Точность управления Адаптация Обучение Самоорганизация заданного уровня</p>	<ul style="list-style-type: none"> - сохраняет преимущества предыдущих уровней ИСУ и составляет основу для технологии проектирования ИСУ; - позволяет осуществлять оптимизацию БЗ; - гарантирует достижение требуемого качества управления на основе спроектированной БЗ; - является открытой системой, которая позволяет вводить дополнительные критерии качества управления; - позволяет создавать БЗ для последующего этапа технологии проектирования, основанной на квантовых вычислениях. 	<ul style="list-style-type: none"> - в силу предельных возможностей поискового алгоритма, как ГА, может гарантировать качество управления только на фиксированном пространстве поиска решений; - процесс проектирования БЗ осуществляется методом комбинаторного поиска на дереве решений.

Используя ОС и механизм супервизорного обучения ННС, основанный на методе обратного распространения ошибки, можно построить БЗ НР, представленного данной ННС. Этот этап рассматривается как Шаг 1 на рис. 5 и подробно описан в [2]. Основной проблемой, решаемой ИСУ второго поколения с ИГОС, является наличие возможности достижения требуемого уровня робастности на заданном классе как параметрических, так и внешних случайных возмущений различной вероятностной природы (с различными функциями плотности распределения вероятностей).

Моделируя поведение ОУ из множества выбранных типовых существенно-нелинейных осцилляторов, было проведено исследование предельных возможностей этапа 1. В результате установлено, что в случае неустойчивых и существенно-нелинейных ОУ, а также при воздействии на них Рэлеевского стохастического шума возможно достижение определённого уровня робастности для частных классов случайных возмущений.

Однако в общем случае не удаётся построить робастную БЗ, используя только этап 1 технологии построения БЗ ИСУ (см. рис. 5). Анализ результатов моделирования САУ на базе первого этапа технологии показал, что основным недостатком данного этапа является неоптимальный выбор структуры ННС, аппроксимирующей ОС. Как правило, в системах проектирования БЗ ИСУ такого типа, построение соответствующей структуры ННС возложено на опытного человека-эксперта. ОС разделен на входные и выходные составляющие, каждая из которых, в свою очередь, состоит из одного и более сигналов.

В общем виде каждый из исследуемых сигналов является выборочной (представительной) траекторией некоторого случайного процесса. При этом подразумевается, что в каждый момент времени существует зависимость между входными и выходными сигналами. Например, в случае аппроксимации некоторого управляющего сигнала, входными компонентами могут являться ошибка управления и производная ошибки (скорость ошибки управления), а выходным компонентом - требуемое значение управляющего воздействия, либо некоторые настраиваемые параметры САУ (например, коэффициенты усиления ПИД-регулятора).

Задача эксперта при определении структуры ННС сводится к выбору модели нечеткого вывода и, главным образом, к лингвистическому описанию заданного ОС. Каждой из компонент ОС соответствует некоторая лингвистическая переменная, описывающая сигнал с помощью соответствующего этой лингвистической переменной терм-множества. Мощность терм-множества и параметры составляющих его элементов (класс и параметры функции принадлежности) неизвестны. «Полноту» лингвистического описания сигнала можно задать на уровне взаимосвязи терм-множеств, входящих в лингвистические переменные. Эту задачу в системах проектирования ИСУ, основанных на традиционных мягких вычислениях (второе поколение ИСУ), также решает человек-эксперт.

Однако, как указывалось выше, в сложных ситуациях управления даже опытному эксперту трудно решить данную задачу вручную (т.е., подобрать оптимальную структуру ННС для заданного ОС). Другой важной проблемой является определение требуемого соотношения между точностью описания (аппроксимации) ОС и необходимым уровнем робастности всей структуры ННС.

Обе указанные проблемы решаются на втором этапе технологии построения БЗ ИСУ с помощью программных средств инструментария, названного ОБЗ [10,13].

2.2 Структурный анализ ИСУ с использованием ОБЗ

С помощью случайного поиска и методологии естественного отбора (на основе структуры ГА, разработанной авторами) были промоделированы различные варианты робастных БЗ. Сформированные робастные БЗ позволяют осуществлять управление сложными ОУ в условиях неопределенности информации о внешних возмущениях на ОУ и изменениях задающих сигналов (целей управления). Робастность законов управления достигается за счет введения векторных функций пригодности ГА, содержащих в качестве одной из компонент физический принцип минимума производства обобщенной энтропии как в ОУ, так и в интеллектуальном регуляторе [8,11]. Такой подход позволяет: (1) осуществить принцип проектирования оптимальной ИСУ с максимальным уровнем надежности и управляемости сложным ОУ в условиях неопределенности исходной информации; (2) сократить до требуемого минимума необходимое количество датчиков сбора и передачи информации, как в контуре управления, так и в измерительной системе без потери точности и качества управления [7].

Робастность ИСУ, полученная на основе такого подхода, требует минимума исходной информации, как о поведении ОУ, так и о внешних возмущениях. Система моделирования и проектирования структур ИСУ разработана на основе ОБЗ типа «ГА – ОБЗ – Нечеткий ПИД-регулятор» (см. Таблица 1, позиция 5).

Анализ структур существующих САУ позволил выбрать в качестве базовой, традиционную САУ в виде ПИД-регулятора. Такая структура объединяет в себе максимальное количество критериев качества управления, т.е. устойчивость, точность управления и управляемость, гарантируя определённый (минимальный) уровень робастности. Используя физический закон управления, связывающий эти критерии качества управления, можно разрабатывать ИСУ, удовлетворяющие указанным критериям качества управления.

За счёт введения и взаимодействия ГООС и ИГОС реализован принцип не разрушения нижнего уровня управления в соответствии с иерархией (приоритетом) уровней качества управления (см., рис. 3). Тем самым было определено узкое место в структуре ИСУ, которым является процесс формирования и проектирования БЗ НР. Для решения данной задачи была разработана технология проектирования БЗ под обоснованную единую структуру ИСУ (см., рис. 5) [9, 12].

Как следует из Таблицы 1 (позиция 5) достоинства данного структурного уровня ИСУ заключаются в том, что ИГОС позволяет осуществить построение БЗ НР на основе объективного извлечения знаний из динамического поведения ОУ и самого НР. При этом за счёт использования соответствующей функции пригодности ГА (типа скорости производства энтропии, как физического критерия оптимизации и т.д.) появляется возможность оптимизировать структуру самой БЗ. ИГОС даёт возможность одновременно охватить новые уровни качества управления и элементы самоорганизации. Введение такого уровня качества управления, как обучение, позволяет повысить робастность управления, его устойчивость и совместно с адаптацией, снизить требования к количеству исходной информации о внешних условиях ОУ. Кроме того, за счёт обучения, можно снизить требования к необходимым энергозатратам, как в ОУ, так и в структуре традиционного ПИД-регулятора. Введение ИГОС позволяет извлечь ценную информацию из открытой системы «ОУ + традиционный регулятор».

3. Перспективы развития структур робастных ИСУ с использованием квантовых вычислений

Как отмечалось, одной из основных задач современной технологии проектирования НР является построение и внедрение робастных БЗ в структуру ИСУ с целью повышения способности к самообучению, самоадаптации, самоорганизации. Решение данной задачи приводит, в конечном счете, к повышению уровня робастности разрабатываемой нечёткой САУ. В разделе 2 было рассмотрено подробно взаимоотношение между мерами качества управления и типами инструментария интеллектуальных вычислений (см. рис. 3 и 4). В частности, были исследованы взаимоотношения между устойчивостью, управляемостью и робастностью (см. рис. 2, Уровень 1, и рис. 3). Соответствующие количественные меры и законы взаимоотношения между данными критериями качества управления были включены в программное обеспечение ОБЗ. Эффективность применения инструментария ОБЗ продемонстрирована в [13]. За счет интеграции с системой Матлаб, ОБЗ позволяет вводить дополнительные критерии качества управления, не изменяя исходного кода программных модулей системы. В силу отмеченных выше преимуществ ОБЗ составляет основу для первого этапа технологии проектирования ИСУ [9].

Разработанный ОБЗ может работать на одном пространстве решений (*в силу предельных возможностей ГА*). Для глобальной оптимизации на множестве пространств решений требуется разработать новый вид вычислений, позволяющий объединить множества пространств решений в одно с помощью квантового оператора суперпозиции [6]. Таким новым видом вычислений являются *квантовые вычисления*.

Примечание. В современной теории управления исследовались различные аспекты процессов обучения и адаптации НР. Многие из схем обучения основывались на алгоритме обратного распространения ошибки и их модификациях (см., [2] и цитированную литературу). Процессы адаптации основывались на итеративных моделях стохастических алгоритмов. Эти идеи хорошо работали при проектировании процессов управления в условиях отсутствия слабо формализованных шумов внешней среды или в условиях отсутствия неизвестных шумов в измерительной системе и т.п. В более сложных непредвиденных ситуациях управления методы обучения и адаптации, основанные на алгоритмах обратного распространения ошибки или итеративных стохастических алгоритмах, не гарантировали достижения требуемого уровня робастности и точности процессов управления. Решение данной проблемы, основанной на ОБЗ, было разработано в [12, 13]. Для достижения уровня самоорганизации (см., рис. 3, Уровень 3) в ИСУ необходимо использовать квантовый нечеткий вывод - КНВ [14]. Общая функциональная структура блоков КНВ описана в [14]. Модель КНВ основана на законах квантовых вычислений: (1) операции вычисления основаны на унитарных, обратимых квантовых операторах; и (2) квантовый алгоритм основан на трёх основных унитарных операциях, а именно: (i) суперпозиция; (ii) квантовая корреляция (квантовый оракул или перепутанные операторы); и (iii) интерференция. Четвёртый оператор измерения результатов квантовых вычислений является необратимым и относится к классу классических операторов. Согласно общим идеям вычислений на квантовых алгоритмических ячейках (КАЯ) [15], логическое объединение отдельных БЗ в одно обобщённое пространство может быть реализовано с помощью оператора суперпозиции; с помощью оператора квантовой корреляции (который может быть описан различными моделями квантового оракула [15]) может быть

Первый уровень основан на ОБЗ, второй - на квантовых вычислениях. Примеры применения ОБЗ на квантовых вычислениях рассмотрены в [16].

Заключение

Разработанная структура робастной ИСУ и инструментария ОБЗ позволяет сделать следующие выводы.

1. Представленные в статье методы разработки и технология проектирования ИСУ на основе ОБЗ позволяют осуществить принцип проектирования оптимальной ИСУ с максимальным уровнем надежности и управляемости сложным ОУ в условиях неопределенности исходной информации, а также при наличии стохастических шумов различной физической и статистической природы.
2. Сформированные БЗ с помощью ОБЗ вырабатывают робастные законы управления коэффициентами усиления традиционных ПИД-регуляторов для широкого диапазона внешних возмущений и максимально нечувствительны к случайным изменениям структуры ОУ. Робастность законов управления достигается введением векторной функции пригодности ГА, одна из компонент которой описывает физический принцип минимума производства обобщенной энтропии как в ОУ, так и в системе управления, а другие компоненты описывают традиционные критерии качества управления как минимум ошибки управления и т.п.
3. Подход, основанный на использовании ОБЗ для проектирования робастных ИСУ, позволяет: (1) проектировать оптимальную ИСУ с максимальным уровнем надёжности и управляемости для множества динамических систем при наличии неопределённости в начальной информации [11]; (2) уменьшить число датчиков, как в контуре каналов управления, так и в самой измерительной системе без потери точности и качества управления [7]; (3) робастная ИСУ, полученная на основе такого подхода, требует минимума исходной информации как о поведении ОУ, так и о внешних возмущениях [12].

Список литературы

- [1] Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. и др. Теория моделей в процессах управления: Информационные и термодинамические аспекты. М.: Наука, 1978.
- [2] Кураваки И., Литвинцева Л.В., Ульянов И.С. и др. Построение робастных баз знаний нечётких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. Ч. I // Изв. РАН. ТИСУ. 2004. № 4.
- [3] Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. и др. Проблемы управления релятивистскими и квантовыми динамическими системами. М.: Наука, 1982.

- [4] Алиев Р.А., Ульянов С.В. Нечёткие модели процессов и систем управления // Итоги науки и техники (ВИНИТИ). Сер. Техн. Киберн. 1990. Т.29; 1991. Т. 32.
- [5] Petrov B.N., Pugachev V.S., Ulyanov S.V. et all. Informational foundations of qualitative theory of control systems // Proc. 7th IFAC. Helsinki, Finland. 1978. Vol. 3.
- [6] Ульянов С.В., Язенин А.В., Такахаши К. и др. Моделирование и проектирование интеллектуальных робастных систем управления с использованием квантовых и мягких вычислений // Тез. докл. конф. по теории управления, посвященной памяти академика Б.Н. Петрова. М.: ИПУ, 2003.
- [7] Ulyanov S.V. Self-organized control system. US patent № 6,411,944 B1, 1997.
- [8] Ulyanov S.V., Yamafuji K., Kurawaki I. et all. Computational intelligence for robust control algorithms of complex dynamic systems with minimum entropy production. Pt 1 // J. Advanced Computational Intelligence. 1999. V. 3, № 2.
- [9] Литвинцева Л.В., Ульянов С.С. и др. Программная поддержка процессов формирования, извлечения и проектирования баз знаний робастных интеллектуальных систем управления // Программные продукты и системы (ППС). 2004. № 2.
- [10] Litvintseva L.V., Ulyanov S.V. et all. Soft computing optimizer of intelligent control system structures. US patent № 20050119986, 2005.
- [11] Ulyanov S.V. System for intelligent control based on soft computing. US patent № 6,415,272, 1998.
- [12] Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Построение робастных баз знаний нечётких регуляторов для интеллектуального управления существенно- нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН. ТиСУ. 2006. № 5.
- [13] Сорокин С.В., Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. Технология мягких вычислений в проектировании робастных нечетких систем управления: Оптимизатор баз знаний // Нечеткие Системы и Мягкие Вычисления. 2008. Т. 3. № 1.
- [14] Литвинцева Л.В., Ульянов И.С., Ульянов С.В. Квантовый нечеткий вывод для создания баз знаний в робастных интеллектуальных регуляторах // ТиСУ. 2007. № 6.
- [15] <http://www.qcoptimizer.com>