

Таким образом, можно сделать вывод, что построение нечеткого регулятора, в которых в качестве эталонных используются системы управления с промышленными регуляторами способствует значительному улучшению основных показателей качества переходного процесса, таких как величина перерегулирования, время перерегулирования, число колебаний, время достижения первого максимума.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъев В.В.* Автоматизированная система управления розжигом горелок при работе котла на природном газе // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 7 (84). – С. 128-136.
2. *Молчанов А.Ю., Финаев В.И.* Модели систем автоматической оптимизации с нечеткими параметрами. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 218 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Е. Золотовский.

**Игнатъев Владимир Владимирович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: vova3286@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Больничная, 28; тел.: 89286083925; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; ассистент.

**Коберси Искандар Сулейман** – e-mail: iskobersi@gmail.com; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 17; тел.: 89518382131; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

**Ignatyev Vladimir Vladimirovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: vova3286@mail.ru; 28, Bolnichnaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79286083925; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; assistant.

**Kobersi Iskandar Suleiman** – e-mail: iskobersi@gmail.com; 17, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79518382131; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 62-551

**Д.А. Белоглазов, Е.Ю. Косенко**

#### **АНАЛИЗ МЕТОДОВ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

*Рассмотрены проблемы синтеза систем управления плохо формализованными техническими объектами. Выполнен сравнительный анализ применимости в условиях неопределенности наиболее распространённых методов проектирования регуляторов: классического, робастного, нечеткого, нейронного. Приведены особенности разработки и практического использования нечетких регуляторов. Выполнен анализ качественных характеристик наиболее распространенных методов исследования устойчивости нечетких контроллеров: Ляпунова, гармонической линеаризации Попова. Приведены доводы в пользу необходимости проведения исследований систем управления, реализованных на основе аппарата нечеткой логики.*

*Искусственный интеллект; нечёткая логика; регулятор; управление; устойчивость.*

**D.A. Beloglazov, E.Yu. Kosenko**

#### **STUDY OF STABILITY OF FUZZY MANAGEMENT SYSTEMS**

*In this work the problem of synthesis of control systems poorly formalized technical objects. A comparative analysis of the applicability of the uncertainty in the most common methods of designing controllers: classic, robust, fuzzy, neural. Are given particular the development and*

*practical application of fuzzy controllers. The analysis of the qualitative characteristics of the most common methods of studying the stability of fuzzy controllers: Lyapunov harmonic linearization Popov. Are arguments in favor of the need for research management system, implemented on the basis of fuzzy logic. Artificial intelligence; fuzzy logic; control; management and sustainability.*

*Artificial intelligence; fuzzy logic; control; management and sustainability.*

**Введение.** Решение задач управления для технических, технологических объектов сопряжено с необходимостью получения некоторой информации относительно их строения, внутренних взаимосвязей, особенностей протекающих в них процессов и т.д. Достоверность данной информации непосредственно определяет выбор метода и качество синтезируемого регулятора.

Классическая теория автоматического управления (ТАУ) ориентирована на решение задач синтеза регуляторов на основе точного математического описания ОУ [1, 2]. Наличие адекватных математических моделей (ММ) ОУ позволяет находить параметры регулятора на этапе его проектирования. Недостатком использования ММ является невозможность или существенная сложность их получения в ряде случаев, что обусловлено наличием свойств неопределённости, нестационарности, последствия ОУ [3].

К настоящему времени разработаны различные подходы [3, 5], например адаптивный, робастный, нечеткий, нейронный, позволяющие снизить зависимость процесса синтеза регуляторов от степени изученности ОУ. Каждый из подходов имеет свои особенности, достоинства и недостатки, а также применим при определенной степени неопределенности.

**Сравнительный анализ методов управления.** Классические методы [1–3] управления обладают проработанным математическим аппаратом, обеспечивающим относительную простоту синтеза и исследования регуляторов. Они предназначены для управления хорошо изученными, формализованными объектами [3]. Классический подход основан на утверждении [1–3], что все неизвестные параметры ОУ можно измерить, идентифицировать, т.е. получить их точные физические значения либо пренебречь ими без потери точности работы системы, что не всегда выполнимо.

Адаптивные методы управления [3, 5] позволяют синтезировать системы способные к самонастройке и самоорганизации, ориентированы на работу с параметрическими, сигнальными, функциональными неопределенностями. Недостатками использования адаптивных систем являются необходимость осуществления активных действий с ОУ, наличия эталонных моделей ОУ, идентификатора [3].

Задача управления нестационарным, плохо изученным объектом с помощью робастного регулятора [3, 5] может быть сформулирована следующим образом: имеется определенное множество неизвестных параметров, синтезируемый регулятор должен обеспечивать приемлемое качество управления согласно выбранному заранее критерию при любых возможных значениях этих параметров. Понятие робастности подразумевает наличие регулятора, множества объектов и фиксацию определенной характеристики системы [3, 5]. Недостатком робастных регуляторов является то, что в процессе своего функционирования они никак не используют поступающую информацию о неопределенностях, не способны обучаться.

Интеллектуальное управление, как правило, строится на основе таких методов искусственного интеллекта как нечеткая логика; искусственные нейронные сети [3–7].

Принцип нечеткого управления базируется не столько на применении теоретических или аналитических моделей, сколько на практическом применении экспертных знаний. По утверждению специалистов, основное преимущество нечет-

ких систем заключается в том, что знания в этих системах представляются в форме легко понимаемых человеком гибких логических конструкций, таких как правила «IF... - THEN» [3].

Нечеткие регуляторы позволяют реализовывать системы управления объектов с существенными нелинейностями, что невозможно при использовании классических регуляторов. Основные трудности при использовании нечетких систем на практике связаны с априорным определением базы правил и построением функций принадлежности.

Нейронные сети представляют собой существенно упрощенную биологически подобную структуру, вычислительная мощь которой основана на способности к адаптивному обучению путем анализа положительных и отрицательных воздействий. Практическое применение нейронных сетей (НС) для решения определенных задач ставит перед исследователем проблему выбора архитектуры сети, которая до сих пор не решена [3, 7]. Она заключается в том, что заранее невозможно сказать какая архитектура НС будет более успешно применима в данных условиях, ответ на этот вопрос имеет принципиальное значение и пока не найден.

В табл. 1 представлен сравнительный анализ применимости методов управления в условиях неполноты данных [3].

Таблица 1

**Сравнительный анализ методов управления**

Требования применимости	Методы управления				
	Классические	Адаптивные	Робастные	Нечеткие	Нейронные
Управление существенно нелинейными объектами	-	+	+	+	+
Управление объектами содержащими неопределенности	-	+	+	+	+
Необходимость использования ММ объекта управления	+	±	±	-	-
Необходимость идентификации ОУ посредством внешних воздействий	-	±	-	-	-
Использования опыта экспертов в предметной области	-	-	-	+	-

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение методов искусственного интеллекта, а именно нечеткой логики, искусственных нейронных сетей, применительно к решению задач управления сложными техническими объектами, содержащими в своем описании неопределенности, более целесообразно по сравнению с рассмотренными аналогами.

Анализ количества публикаций, внедрений нечетких регуляторов по сравнению с нейросетевыми позволяет говорить о преимуществе первых, что объясняется их большей логической прозрачностью, простотой аккумуляции и использования экспертных знаний.

**Проблема исследования устойчивости нечетких регуляторов.** В настоящее время в рамках классической ТАУ разработаны и используются различные аналитические методы исследования устойчивости [1, 2, 6]. Они позволяют получать информацию о будущем поведении систем управления на начальных этапах проектирования.

Для нечетких регуляторов (НР) общепринятых, универсальных методов проверки устойчивости на сегодняшний день не существует [6], но есть попытки адаптации классических аналитических подходов. В табл. 2 приведен сравнительный анализ применимости аналитических методов исследования устойчивости для нечетких систем управления [6].

Основная сложность аналитического исследования устойчивости НР заключается в их существенной нелинейности, невозможности линеаризации. В том случае, если математическая модель объекта управления отсутствует говорить о проведении теоретического исследования системы управления бессмысленно [6].

Таблица 2

**Анализ применимости аналитических методов исследования устойчивости  
в условиях неопределенности**

Суть метода	Достоинства	Недостатки
<i>Первый метод Ляпунова</i>		
Производится анализ линеаризованных уравнений системы	Применим для систем любой структуры	Дает лишь необходимые условия устойчивости
		Система должна содержать только линеаризуемые нелинейности
<i>Второй (прямой) метод Ляпунова</i>		
Сводит задачу исследования устойчивости системы к исследованию функции Ляпунова	Универсальность	Дает лишь достаточное условие устойчивости.
	Позволяет определить область устойчивости относительно начальных условий, а также некоторые показатели качества системы	Сложность выбора функции Ляпунова
		Громоздкость выкладок.
<i>Метод гармонической линеаризации (гармонического баланса, описывающих функций)</i>		
Расчет производится только по нескольким первым (обычно одной первой) гармоникам сигналов, действующих в системе	Позволяет определить некоторые показатели качества системы	Не является ни необходимым, ни достаточным
		Применим для нелинейных систем специального вида (выделенная линейная и нелинейная части)
	Простота, наглядность	Необходимо выполнение гипотезы фильтра
<i>Метод Попова (для непрерывных систем) Геометрический критерий устойчивости, критерий Цыпкина (для дискретных систем)</i>		
Позволяет определить сектор, при нахождении в котором характеристики статического нелинейного элемента системы будет устойчива в целом (абсолютная устойчивость)	Позволяет определить некоторые показатели качества системы	Дает лишь достаточное условие устойчивости
	Простота, наглядность	Применим для нелинейных систем специального вида (выделенные линейная и нелинейная части)

Рассмотренные методы анализа нечетких систем управления обладают существенными недостатками, в большинстве своем не дают строгого обоснования устойчивости, а скорее обеспечивают возможность проверки работоспособности, когда точно известен вид возмущающих и входных воздействий на систему, вид начальных условий и т.д. [8].

В случае неприменимости аналитических методик возможным решением может послужить использование эмпирических, экспериментальных подходов [8]. Их основная идея заключается в необходимости синтеза и последующего компьютерного анализа нечетких моделей объекта управления и регулятора. Применение современной вычислительной техники, программных пакетов моделирования, таких как MATLAB, позволяет вести всесторонний анализ сложных многомерных систем, независимо от числа воздействующих на них сигналов.

Недостатком эмпирических методов является существенная сложность или невозможность обобщения получаемых на их основе результатов. Они просто подтверждают устойчивость системы применительно к конкретным условиям, рассматривавшимся в ходе моделирования [8].

Поиск методов, позволяющих проводить исследования устойчивости систем управления на основе аппарата нечеткой логики, ведется давно, но результаты, более или менее удовлетворяющие требованиям практической применимости получены относительно недавно, в конце прошлого десятилетия [8]. Большинство методов представляют собой адаптацию методов исследования устойчивости из классической теории управления.

Сложности, возникающие при попытке подтвердить устойчивость нечетких систем управления, сужают область их практического применения [8]. Изменение сложившейся ситуации требует дальнейшего проведения интенсивных исследований в данной области.

**Необходимость проведения исследований устойчивости нечетких регуляторов.** В отношении обязательной необходимости исследования устойчивости нечетких систем управления существуют два противоположных мнения.

Первый подход основывается на высказывании одного из основоположников применения нечетких систем управления Мамдани (Mamdani) [6]: «Промышленность никогда не требовала, чтобы математический анализ устойчивости являлся необходимым и достаточным условием для признания хорошо разработанной системы управления. Подобное условие – это просто желание ученых, но оно не имеет никакой ценности за пределами академических кругов».

Гораздо более важным, чем анализ устойчивости, является испытание прототипа; самостоятельный анализ устойчивости никогда не может считаться достаточным тестом. Более того, в любой практически полезной методологии этап анализа устойчивости – желательный, но только дополнительный, а отнюдь не необходимый этап».

Второй подход, полностью противоположен первому, считает исследование устойчивости одним из самых важных, необходимых этапов проектирования систем управления. В его основе лежит обязательное к исполнению требование промышленных нормативов, принятое государственными органами многих стран мира. Это требование представляет собой обязательное условие для использования систем управления [8].

Количество практических задач, для которых проверка устойчивости управления расценивается как проблема критической важности в настоящее время велико, например обеспечение безопасности людей в процессе их транспортировки авиатранспортом, сохранность дорогостоящих объектов, управление сложными технологическими процессами подверженными потере устойчивости [8] и т.д.

Каждый из приведенных подходов имеет свои достоинства и недостатки. Конечно, отсутствие необходимости проведения исследований устойчивости систем управления на этапе проектирования может несколько снизить трудоемкость разработки. С другой стороны, есть существенный риск принятия заведомо неверных решений, ошибок, которые могут проявиться в момент испытания работоспособности регулятора.

Устранение недостатков в таком случае будет сопряжено с необходимостью изменения параметров, структуры регулятора, проведения повторных экспериментов. Такой подход не является правильным, хоть и применяется в настоящее время весьма часто, требует больших затрат времени и сил проектировщика. Более верным представляет поиск способов исследования устойчивости НР на начальных этапах проектирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Красовский А.А.* и др. Современная прикладная теория управления: Оптимизационный подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч. 1. – 400 с.
2. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2011. – 307 с.
3. *Белоглазов Д.А.* Разработка и исследование методов синтеза адаптивных регуляторов на основе нейронечетких сетевых структур: Дис. ... канд. тех. наук. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012.
4. *Финаев В.И., Стефаненко В.К., Скубилин М.Д., Заргарян Ю.А., Шаповалов И.О.* Автоматическая оптимизация и моделирование звеньев систем управления. – Киев: ПП «ОДА»Ю 2012. – 272 с.
5. *Пупков К.А., Егунов Н.Д.* и др. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егунова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 744 с.
6. *Усков А.А., Круглов В.В.* Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики. – Смоленск: Смоленская городская типография, 2003. – 177 с.
7. *Круглов В.В., Борисов В.В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия–Телеком, 2002. – 382 с.
8. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление / Пер. с польского. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. – 798 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Е. Золотовский.

**Белоглазов Денис Александрович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: fin\_val\_iv@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

**Косенко Евгений Юрьевич** – e-mail: kosenko@tti.sfedu.ru; зам декана ФАВТ; к.т.н.; доцент.

**Beloglazov Denis Alexandrovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: fin\_val\_iv@tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; assistant.

**Kosenko Evgenii Yurevich** – e-mail: kosenko@tti.sfedu.ru; deputy dean of the faculty of automation and computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.