# ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Черного Сергея Петровича «Теория и практика развитых нечетких алгоритмов в управлении технологическими процессами», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

## 1. Актуальность темы диссертационного исследования

Решение задач управления с применением теории нечетких множеств в настоящее время либо строго ориентируется на реализацию процедур управления конкретным объектом, либо направленно на модернизацию параметров основных блоков регулятора. Таким образом, актуальность диссертационного исследования связана с разработкой и исследованием нечетких систем управления с применением регуляторов, построенных на основе мягких вычислений, позволяющих объединить и повысить интеллектуальные возможности нечетких систем управления путем их структурного и функционального объединения в многокаскадные структуры и дающими возможность решать задачу регулирования сложными технологическими процессами в условиях многокритериальности, многозадачности и многокоординатности.

Определенную научную проблему представляет отсутствие комплексного подхода позволяющего создавать развитые нечеткие системы управления, которые учитывают многокритериальность, нестационарность, многокоординатность технологических процессов. Кроме того, неотъемлемым условием при построении многокаскадных нечетких систем управления является создание формализованного подхода к описанию таких развитых систем, учитывающего гомогенность и гетерогенность структуры системы управления, сочетания алгоритмов нечеткого логического вывода, а также количество вложенных модулей.

## 2. Научная новизна диссертационной работы

***Новизна научных положений и полученных результатов*** определяется предложенным автором комплексным подходом создания многокаскадных нечетких систем управления технологическими объектами, что потребовало:

1. Разработки новых принципов построения многокаскадных нечетких систем, позволяющих значительно упростить процессы настройки, расширения его адаптивных свойств и существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора;

2. Обоснования предложенных алгоритмов многокаскадного нечеткого управления позволяющих сократить информационную избыточность и алгоритмическую сложность интеллектуальных систем регулирования технологическими процессами, за счет снижения алгоритмической сложности формируемых баз правил интеллектуальных модулей;

3. Проработки структурной и функциональной реализации нечетких систем управления, характеризующихся пространственной формой

реализации функций принадлежности и позволяющих учитывать ряд параметров технологического процесса имеющих лишь косвенную связь;

4. Разработки моделей и рекомендаций по настройке основных блоков развитых нечетких систем с учетом вложенности, гетерогенности и вариации сочетания различных алгоритмов нечетких логических выводов;

5. Разработки структурных и методологических решений по реализации комплексных подходов для сложных объектов управления, обеспечивающих реализацию процедур управления адаптирующихся к изменению полноты информационного обеспечения, нестационарности и недетерминированности;

6. Развития подходов к компенсации различного рода нелинейностей систем регулирования технологическими процессами на основе принципов многокаскадного нечеткого управления.

## 3. Практическая значимость диссертационной работы

Содержится в:

- методике настройки многокаскадных нечетких регуляторов для систем управления технологическими процессами, учитывающей особенности математического описания систем, так и наличие неоднозначных функциональных связей между координатами системы.
- программно-аппаратной реализации многокаскадного нечеткого логического регулятора (МНЛР) на основе промышленного программируемого контроллера для управления процессом стабилизации скорости электропривода.
- рекомендациях по совершенствованию нечеткой системы управления процессом пиролиза в мобильной углевыжигательной установке.

## 4. Степень обоснованности и достоверности полученных научных положений, выводов и заключений

Обоснованность основных положений диссертации в целом подтверждается корректным применением математического аппарата, теоретических положений из смежных научных дисциплин, аргументированным подходом к постановке задач и получению результатов.

Сформулированные в диссертационной работе выводы подтверждены соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований, которые выполнены в достаточном объеме.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается тестированием предложенных решений, а так же результатами прикладного исследования (приведены акты об использовании и внедрении).

## 5. Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Диссертация изложена на 318 страницах. Список литературы состоит из 356 наименований.

Во введении приведены актуальность темы исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели и задачи, рассмотренные в диссертационной работе.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ теоретических и практических направлений исследований области управления технологическими процессами с применением аппарата теории нечетких множеств, проводимые, как за рубежом, так и отечественными коллективами ученных. Показаны основные задачи, вызывающие интерес у исследователей в области систем управления с искусственным интеллектом, а также обозначены проблемы, решение которых на данный момент является затруднительным.

Вторая глава посвящена разработке математического описания многокаскадного нечеткого регулятора при различных сочетаниях алгоритмов нечеткого вывода, а также показаны особенности реализации этого формализованного подхода с учетом применения упрощенного алгоритма нечеткого вывода во внешнем каскаде, приведена обобщенная функциональная схема нечеткого логического регулятора, построенного по каскадному принципу. На основе разработанного математического описания предложены различные структурные решения по реализации многокаскадных нечетких регуляторов с учетом особенностей функционирования механизмов выводов.

*В третьей главе* показано применение многокаскадных нечетких систем при решении задачи компенсации естественных и искусственных нелинейностей. Внешний каскад нечеткого регулятора осуществляет выбор способа компенсации нелинейного элемента, вложенные нечеткие модули реализуют непосредственно выбранный способ компенсации: в прямом канале, параллельно или обратной связи. Доказана эффективность применения многокаскадных нечетких регуляторов при решении задачи позиционирования. Использование предложенного подхода позволяет рассматривать совокупность больших и малых перемещений системы, а также возможность интеллектуального переключения между такими режимами. Показаны возможности по настройке многокаскадных нечетких систем управления с применением программного обеспечения и нейросетевых алгоритмов.

*Четвертая глава* посвящена разработке принципов построения многокаскадных нечетких логических регуляторов систем управления технологическими процессами, которые функционируют в условиях многокритериальности. Показано, что элементы вложенного каскада нечеткого регулятора могут быть решать задачу управления с учетом различных требований: быстродействия, точности и даже реализации ограничений на заданный вид сигналов в системе.

*В пятой главе* диссертационной работы показано применение предложенного подхода по структурной и функциональной реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора для систем управления с пространственной формой функций принадлежности.

*В шестой главе* рассмотрено посторенние многокаскадного нечеткого логического регулятора вложенный каскад, которого реализуется с применением управляющих модулей с различными алгоритмами вывода.

*В седьмой главе* проведена экспериментальная проверка работоспособности предложенной методики.

*В заключении* приводятся итоговые выводы по всему объему диссертации и намечены пути дальнейших исследований.

**Апробация результатов работы**

*Содержание оппонируемой диссертации соответствует* специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки). Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и научно-технических конференциях. По теме диссертации опубликовано 68 работ, из них 15 статей в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах, 25 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, из которых 6 категорий К1 и К2.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает основное содержание диссертационной работы и полученные автором научные результаты.

В приложениях, представлены акты об использовании и внедрении результатов исследований, указывающие на практическую значимость работы и подтверждающие ***достоверность*** выдвигаемых автором положений.

**6. Основные замечания по работе**

1. В работе рассмотрено построение внешнего каскада нечеткого регулятора на основе алгоритма вывода Сугено нулевого порядка и не понятно как скажется повышение порядка этого алгоритма на структуру и свойства многокаскадной системы управления.
2. Не проводилась оценка скорости вычислений при реализации многокаскадного нечеткого логического регулятора при достижении заданных показателей качества одновременно по нескольким критериям.
3. Не показаны в полном объеме исследования нечеткого регулятора с пространственными функциями принадлежности для многомерного объекта управления.
4. Основная масса многокаскадных нечетких логических регуляторов в диссертационной работе базируется на использовании известных функций принадлежности нечетких множеств (например, треугольного вида), и обоснование выбора используемых форм функций принадлежности недостаточно изложено.
5. Для случая гетерогенности структуры многокаскадного нечеткого регулятора подразумевается наличие во внутреннем каскаде различных алгоритмов логического вывода, но результаты исследования динамики

замкнутого контура в условиях неопределенности параметров модели объекта для данного случая не приведены в работе.

Отмеченные недостатки не снижают научной и практической значимости работы в целом, и общая оценка остается высокой.

**7. Общее заключение о соответствии диссертационной работе требованиям, предъявляемым к кандидатским и докторским диссертациям**

Результаты научных исследований и выводы, полученные Черным С.П., указывают на актуальность выполненных исследований по созданию развитых нечетких систем управления позволяющих учесть такие особенности технологических процессов как многокритериальность, нестационарность, многокоординатность. В диссертационной работе выполнена детальная проработка поставленных вопросов. Работа выполнена на высоком уровне, имеет большое практическое значение, написана технически грамотно с правильным логическим изложением материала.

Диссертационная работа отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, и соответствует пунктам 9-14 «Положения о присуждения ученых степеней» (Постановление правительства РФ от 24.09.2013 г. за № 842), а ее автор Черный Сергей Петрович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник лаборатории систем управления технологическими процессами Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

_____Торгашов Андрей Юрьевич

«08» апреля 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук
Почтовый адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, дом 5
Телефон: 8(423)231-09-26
Электронная почта: director@iacp.dvo.ru
Сайт: https://www.iacp.dvo.ru/

«ЗАВЕРЯЮ»
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИАПУ ДВО
КАНД. ТЕХН. НАУК, ДОЦЕНТ
С.Б. ЗМЕУ