

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и инновационной
работе ФГБОУ ВО «Магнитогорский

государственный технический
университет им. Г.И. Носова»

доктор технических наук, профессор

О.Н. Тулупов

«26» апреля 2024 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» 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)

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационное исследование Черного С.П. посвящено расширению интеллектуальных возможностей нечетких систем управления, на основе регуляторов построенных на принципах многокаскадности, а также созданию формализованного подхода учитывающего гомогенность и гетерогенность структуры, особенности сочетания алгоритмов нечеткого логического вывода, количества вложенных интеллектуальных модулей. Анализ влияния сочетания различных алгоритмов выводов на качество процедур управления сложными объектами, устранение неопределенности и неполноты информации по ряду основных параметров такого объекта, реализация многокритериальности при управлении технологическим процессом на его различных стадиях и режимах функционирования, возможности реализации пространственных функций принадлежности с применением нечеткого многокаскадного регулятора обуславливают возникновение проблемы создания теоретической и практической базы для реализации развитых нечетких систем управления технологическими процессами, в связи с чем тема диссертации является актуальной.

Краткий обзор содержания работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений. Основной текст диссертации изложен на 318 страницах (без приложений) и содержит 235 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 356 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна, выделены основные положения, выносимые на защиту, отражены теоретическая и практическая значимость результатов проведенного исследования.

В главе 1 проведен анализ теоретических и практических направлений исследований в области управления технологическими процессами с применением аппарата теории нечетких множеств, приведены основные решаемые задачи, вызывающие интерес у исследователей в этой области, а также обозначены проблемы, решение которых на данный момент является затруднительным.

Проанализированы технологические процессы, для которых реализуется интеллектуальный подход в управлении, показаны возможности повышения интеллектуальности таких систем, путем увеличения количества лингвистических переменных формализующих понятия входных и выходных информационных составляющих, роста объема и размерности баз знаний, основанных на продукционных моделях представления. Рассмотрены простейшие нечеткие регуляторы, с одним или двумя входами и одним выходом, выявлено, что типовые алгоритмы нечеткого регулирования не способны в полной мере аппроксимировать функции, описывающие сложные законы управления, которые уже не являются непрерывными и монотонными и обладают разрывами. В то же время системы управления, основанные на классических регуляторах, не обладают достаточной гибкостью и адаптивностью для применения их при управлении в условиях неполноты, а зачастую и противоречивости исходной и поступающей информации. Выявлены возможности для расширения основных свойств нечетких логических регуляторов, которые позволяют упростить процесс их настройки и интеграции в сложные технологические процессы, а также повысить их способности по адаптации. Предложена методика по внедрению модульного подхода при реализации нечетких систем с развитой структурой.

В главе 2 приведено математическое описание многокаскадного нечеткого логического регулятора, учитывающее особенности алгоритмов вывода, применяемых во внешнем каскаде управления. На основании представленной математической модели определены особенности построения структур развитых нечетких логических регуляторов и выделена специфика их функционирования. Формализованы и представлены в виде функциональных схем взаимосвязи компонентов и модулей для различных алгоритмов нечеткого вывода для многокаскадных систем управления технологическими процессами. Приведены структурные решения разработанной автором методологии моделирования многокаскадных нечетких логических регуляторов для различных вариаций алгоритмов выводов. Показаны и проанализированы особенности сочетаний алгоритмов нечеткого вывода таких как Мамдани-Мамдани, Мамдани-Сугено и Сугено-Мамдани.

Кроме того, необходимо отметить, что в состав предложенного подхода вошли как ранее известные результаты, так и новые исследованные и апробированные методики, формирующие основу для моделирования многокаскадных нечетких логических регуляторов и позволяющие реализовать развитые системы управления технологическими процессами для целого ряда прикладных задач. Для оценки эффективности предлагаемой методики выделены и исследованы основные направления по повышению интеллектуальных возможностей нечетких систем управления, которые представлены в виде комплекса графиков.

В главе 3 показано применение многокаскадных нечетких систем для реализации процедур управления при решении задач регулирования приводов постоянного тока в рамках следящей системы при трансформации законов регулирования, а также формировании и классификации этих законов при компенсации произвольного вида нелинейностей.

Предложенный подход позволяет комплексно решать задачи компенсации искусственных и естественных нелинейностей, при этом на внешний каскад возлагаются функции классификации нелинейности и выбора способа компенсации, а элементы внутреннего каскада непосредственно реализуют классические способы, в зависимости от вида статической характеристики нелинейного элемента.

Реализация законов управления технологическим процессом с использованием интеллектуального подхода, основанного на теории нечетких

множеств, зачастую ограничивается применением одного модуля, организованного на единственном алгоритме вывода. Типичным объектом управления для такого рода систем являются модели электроприводов постоянного тока. Нечеткий регулятор в таких системах, как правило, реализует аналог ПИД-закона управления с учетом ряда дополнительных информационных сигналов. В целом реализация систем управления, содержащих элементы нечеткой логики, позволяет сформировать различные сложные законы регулирования, но при этом существенно увеличивается алгоритмическая сложность основных блоков самого нечеткого регулятора. Ограничивающими факторами при этом будут являться как количество лингвистических переменных на входах и выходах и размер базы правил, так и сложность при выборе алгоритма вывода и формы функций принадлежности.

Реализация нечеткого регулятора по каскадному принципу дает возможность внешнему каскаду управления интеллектуально совмещать различные настройки системы управления, например, совмещая настройки регулятора по симметричному оптимуму с оптимумом по модулю передаточной функции, т. е. позволяет решать многокритериальную задачу регулирования сложного технологического объекта.

В главе 4 показано применение в предложенного подхода, основанного на принципах модульности и каскадности для построения развитых нечетких систем управления технологическими процессами с учетом возможного набора критериев, действующих на объект регулирования. Показано, что система управления может быть настроена на целый ряд различных критериев, например быстродействие и точность, за счет разделения внутреннего каскада на две части. Такая настройка развитой нечеткой системы управления возможна для случаев взаимного влияния элементарных модулей вложенного каскада, аналогично системам подчиненно регулирования.

Показан порядок перестройки системы управления для случая, когда одна из частей внутреннего каскада реализует функции нелинейного элемента, что позволяет ограничивать любой заданный сигнал в системе управления технологическим процессом. Это позволит повысить адекватность модели сложного объекта регулирования и качество управления.

Рассмотрены возможности расширения диапазона регулирования в многокаскадной нечеткой системе управления внедрением дополнительных простейших интеллектуальных модулей, что позволяет повысить ее свойства

адаптивности и робастности, а также качество реализации процедур управления сложным технологическим объектом с точки зрения предъявляемых требований и гибкой коррекции или изменению самих критериев регулирования.

В главе 5 рассматривается алгоритм формирования нечетких логических регуляторов, который позволяет сформировать выходные функции принадлежности в многомерном пространстве. Использование таких функций принадлежности позволит реализовывать регуляторы технологических параметров с большим количеством взаимосвязанных входных переменных, для которых затруднительно выразить функциональные связи.

При этом сложность реализации подобных нечетких регуляторов с функциями принадлежности в гиперпространственной форме связана с необходимостью либо увеличения степени вложенности каскадов регулирования, либо добавления в модули внутреннего каскада дополнительных выходных лингвистических переменных.

Представлено математическое описание предложенного подхода по формированию функций принадлежности пространственного вида на основе методики многокаскадного нечеткого управления. Определено, что предложенный подход обладает некоторыми ограничениями, основными из которых являются: необходимость использования алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани для всех вложенных модулей, реализации блоков дефаззификации при использовании пространственных функций принадлежности, а также однотипность построения базы нечетких продукционных правил вложенных модулей.

Показано, что реализация моделей многокаскадных нечетких систем с помощью предложенной методики для формирования интеллектуальных регуляторов с пространственной формой функций принадлежности позволяет применять стандартное программное обеспечение и общепринятые языки инженерных вычислений.

В главе 6 рассмотрены особенности реализации предлагаемого подхода формирования многокаскадных контуров регулирования для случая использования гетерогенного состава модулей вложенного каскада, что позволяет решать задачу по управлению технологическим процессом в условиях многокритериальности. При произвольном наборе внутренних модулей нечеткий регулятор, выполняющий функции переключающего устройства,

решает не только задачу по выбору необходимого модуля в рамках реализации сложного закона управления, но и необходимого сочетания этих законов управления с учетом взаимодействия и взаимного влияния критериев, формирующих требуемое положение системы.

Применение модулей внутреннего каскада регулятора с различными функциональными свойствами позволяет решать целый класс дополнительных различных задач, среди которых можно выделить, повышение быстродействия, на основе, применения набора стандартных настроек, реализацию законов управления при формировании частей внутреннего каскада на различные критерии, интеграция ряда существующих локальных систем, как классических, так и нечетких в одну развитую интеллектуальную систему.

В главе 7 рассмотрены возможности применения предложенного подхода для формирования процедур управления электроприводом постоянного тока и пиролизной установкой мобильного типа.

Результаты представленных экспериментов подтверждают предлагаемые теоретические подходы. Показано, что многокаскадные нечеткие алгоритмы управления могут быть реализованы с применением типовых технологических программируемых контроллеров, что является особенно актуальным в разрезе наложенных ограничений нетехнического характера. Предложено программное обеспечение, реализующее развитые нечеткие алгоритмы управления для стандартных программируемых логических контроллеров.

В заключении изложены общий вывод по диссертационной работе, представлены основные результаты исследования, а также перспективы дальнейшего развития тематики.

В приложениях приведены: листинг программного обеспечения, реализующего многокаскадную нечеткую систему управления сложным технологическим процессом при различных механизмах вывода во внешнем каскаде; текст программного модуля с развитой нечеткой системой управления электроприводом постоянного тока; документы, подтверждающие внедрение и использование результатов диссертационной работы.

Научная новизна и основные результаты исследования

Научная новизна работы заключается в создании нового подхода к разработке и формализации развитых нечетких систем управления технологическими процессами, которая включает в себя математическое описание

многокаскадных нечетких регуляторов с реализацией на их основе функций принадлежности пространственной формы, а также алгоритмы, модели, структурные решения, методики и комплекс решений, определяющих в целом научные основы построения развитых интеллектуальных систем управления. При этом в диссертации, в частности, получены следующие результаты, характеризующиеся новизной:

1) предложены новые принципы построения многокаскадных нечетких систем, позволяющие существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора, расширить его адаптивные свойства и значительно упростить процессы настройки;

2) доказано, что предложенные алгоритмы многокаскадного нечеткого управления позволяют сократить информационную избыточность и алгоритмическую сложность интеллектуальных систем регулирования технологическими процессами;

3) показаны возможности структурной и функциональной реализации нечетких систем управления, характеризующихся пространственной формой реализации функций принадлежности;

4) разработаны модели и рекомендации по настройке основных блоков развитых нечетких систем с учетом вложенности, гетерогенности и вариации сочетания различных алгоритмов нечетких логических выводов;

5) представлены структурные и методологические решения по реализации комплексных подходов для сложных объектов управления, обеспечивающих реализацию процедур управления, адаптирующихся к изменению полноты информационного обеспечения, не стационарности и недетерминированности;

6) развиты подходы к компенсации различного рода нелинейностей систем регулирования технологическими процессами на основе принципов многокаскадного нечеткого управления.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертации автором результаты и выводы являются обоснованными и достоверными, что подтверждается:

- корректным использованием математического аппарата, аналитическим и имитационным моделированием, сопоставлением частных

результатов математического моделирования с имеющимися результатами в данной области;

- совпадением результатов математического моделирования и натуральных экспериментов;

- обсуждением результатов диссертации на международных и отечественных конференциях, научных семинарах, выставках и результатами их практической апробации;

- результатами внедрения разработанных алгоритмов управления экспериментальных исследований в промышленности и учреждениях отраслевой системы подготовки кадров.

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на российский и международных конгрессах, конференциях, выставках, научных семинарах и достаточно полно опубликованы соискателем в 68 работах, в том числе: 25 работах, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 15 работах в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science; 2 монографиях, 7 зарегистрированных охраняемых документах на результаты интеллектуальной деятельности.

Значимость полученных автором результатов диссертации для развития соответствующей отрасли науки

Теоретическая значимость диссертации состоит в проработке и систематизации результатов предыдущих исследований, их дополнении и комплексировании с вновь разработанными методами, моделями, алгоритмами и методиками в составе единой методологии синтеза многокаскадных нечетких регулятором сложными технологическими процессами.

Практическая значимость диссертационной работы заключается:

- в разработке методики настройки многокаскадных нечетких регуляторов для систем управления технологическими процессами, учитывающей, как особенности математического описания систем, так и наличие неоднозначных функциональных связей между координатами системы;

- в программно-аппаратной реализации многокаскадного нечеткого логического регулятора на основе промышленного программируемого контроллера для управления процессом стабилизации скорости электропривода.

- в рекомендациях по совершенствованию нечеткой системы управления процессом пиролиза в мобильной углевыжигательной установке.

Результаты диссертационной работы внедрены в области автоматизации технологических процессов в промышленности, а также в учебный процесс: алгоритмическое и программное обеспечение интеллектуальной системы управления комплексом ультразвуковых газокислородных горелок, а также формализация процессов фильтрации сигналов управления пропорциональным регулятором для электрода клапана в дуговой сталеплавильной печи с применением нечеткого регулирования, (ПАО «Амурсталь»), разработка элементов и алгоритмов для интеллектуальной системы управления электроприводом (филиал ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»), анализ возможностей применения и формализация развитых нечетких алгоритмов управления при аппаратной реализации нечеткого логического контроллера и синтез энергоэффективного последовательного управления электроприводом (Амурское ЛПУМГ ООО «Газпром Трансгаз Томск»), в учебном процессе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет». Соответствующие акты внедрения прилагаются.

Замечания по диссертационной работе

По диссертации С.П. Черного имеется несколько замечаний.

1. В работе автор делает вывод о необходимости формирования многокаскадных нечетких регуляторов для устранения существующих недостатков классических нечетких систем регулирования. Однако при исследовании работы таких регуляторов автор ограничивается системами управления с вложенностью каскадов не более двух.

2. При оценке качества переходных процессов в системах с нечеткими регуляторами автор производит сравнение с переходными процессами, полученными в системах с ПИД-регуляторами. При этом не приводится описание методики настройки ПИД-регуляторов в каскадной системе регулирования и сами значения настроечных параметров ПИД-регулятора.

3. Автором предложено интеллектуальное переключающее устройство позволяющее выбирать различные настройки системы управления в соответствии с критериями «МО» и «SO» в зависимости от сочетания различных условий в технологическом объекте. Проведенные автором исследования работы переключающего устройства не дают полного

представления об условиях переключения на разные критерии управления, так эти условия в неявном виде заданы в базе правил (рис.3.76 – 3.78).

4. При формировании многокаскадной нечеткой системы управления автором применен алгоритм нечеткого вывода Сугено первого порядка, для которого приведены результаты исследований качественных характеристик переходных процессов в системе. В работе нет данных о влиянии на качественные показатели системы управления при использовании алгоритма нечеткого вывода Сугено порядка выше первого.

5. При формировании функций принадлежности пространственной формы в многомерном пространстве не показаны особенности их формирования в зависимости от сочетания алгоритмов нечеткого логического вывода.

6. При описании результатов, полученных автором на экспериментальном лабораторном стенде, перечислены технические средства, используемые при реализации системы управления, однако сама организация технических средств не приведена.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационного исследования, а также не ставят под сомнение достоверность и обоснованность полученных автором результатов.

Выводы

Диссертационная работа Черного С. П. представляет собой завершенную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой автором решена научно-техническая проблема синтеза развитых интеллектуальных систем управления на базе теории нечетких множеств с применением каскадного подхода, учитывающего различные сочетания алгоритмов выводов, а также гомогенную и гетерогенную структуру внутренних наполняющих модулей. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее основное содержание.

Диссертационная работа «Теория и практика развитых нечетких алгоритмов в управлении технологическими процессами» отвечает требованиям пп.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», 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 (технические науки).

Диссертационная работа Черного С.П., автореферат и отзыв ведущей организации были рассмотрены и обсуждены на расширенном заседании кафедры «Автоматизированные системы управления». Присутствовало 12 человек, из них 2 доктора наук (протокол № 10 от 23 апреля 2024 года).

Отзыв составлен:

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Автоматизированные системы управления»
института энергетики и автоматизированных систем

 Андреев Сергей Михайлович

Тел. +7(3519)298-558

Докторская диссертация защищена по специальности:

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Вычислительной техники и программирования»
института энергетики и автоматизированных систем

 Логунова Оксана Сергеевна

Тел. +7(3519)298-558

Докторская диссертация защищена по специальности:

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Тел. +7 (800) 100-1934

e-mail: mgtu@magtu.ru

сайта: <https://www.magtu.ru/>

