

УДК 621.321

## Методы нечеткой логики в задачах автоматизации тепловых процессов электростанций

С.И. Новиков, канд. техн. наук, В.Р. Шахнович, асп., А.В. Сафронов, студ.

**Представлен обзор методов нечеткой логики в промышленности. Описаны перспективы использования нечеткого регулирования для автоматизации тепловых процессов.**

*Ключевые слова:* методы нечеткой логики, автоматизация тепловых процессов, электростанция.

## Fuzzy Logic Methods in the Tasks of Thermal Processes Automation of Power Plant

S.I. Novikov, Candidate of Engineering, V.R. Shahnovich, Post Graduate Student, A.V. Safronov, Student

**The article contains an overview of the fuzzy logic methods in industry. The perspectives of fuzzy control application for thermal processes automation are described.**

*Keywords:* fuzzy logic methods, thermal processes automation, power plant.

**Введение.** Технологические процессы современной промышленности не всегда поддаются строгому математическому описанию [1]. Расчет динамики процессов пылеприготовления и пылеподачи, горения и парообразования на ТЭС трудоемок и сложен, что затрудняет их автоматизацию [2]. Теория автоматического управления и ее современные приложения предлагают все новые и новые теоретические возможности совершенствования автоматических систем регулирования и управления, в том числе, использование моделей ТОУ в составе АСУТП, методов нейро-нечеткого управления и др. [3–14].

Поэтому анализ методов обеспечения требуемого качества регулирования автоматических систем представляется актуальным, прежде всего, в аспекте перспективности их применения, в том числе, для автоматизации тепловых процессов.

Автоматические системы регулирования теплоэнергетических процессов строились до последнего времени на базе отечественных промышленных регуляторов (РПИБ; Каскад – 1, 2; Контур – 1, 2; Акэср – 1, 2). В основе реализации этих регуляторов лежали принципы построения систем регулирования, использующих электрические исполнительные механизмы постоянной скорости и типовые законы регулирования [15]. Переход на использование цифровых контроллеров дал определенные преимущества [16]. Например, возможность реализовывать наблюдатели состояния, структуры с ПИД-законом регулирования с большими возможностями Д-составляющей, предсказатели Смидта, сложные вычислительные технологии и т.д. В результате некоторые известные фирмы в своих контрактах гарантируют более высокую точность поддержания технологических параметров. Так, фирма Ansaldo (Италия) гарантирует поддержание температуры первичного и вторичного пара  $\pm 3^\circ\text{C}$  во всем диапазоне нагрузок энергоблока (для сравнения, отечественные системы регулирования обеспечивают

поддержание температуры острого пара  $\pm 6\text{--}13^\circ\text{C}$  и  $\pm 10\text{--}16^\circ\text{C}$  вторичного пара) [15].

Ниже сделана попытка рассмотреть перспективы применения методов нечеткой логики для автоматизации тепловых процессов.

**Основные понятия теории нечетких множеств.** Теория нечетких множеств была предложена американским математиком Лотфи Заде в 1965 г. Применение теории нечетких множеств позволяет описывать нечеткие понятия и знания, оперировать этими знаниями и делать нечеткие выводы.

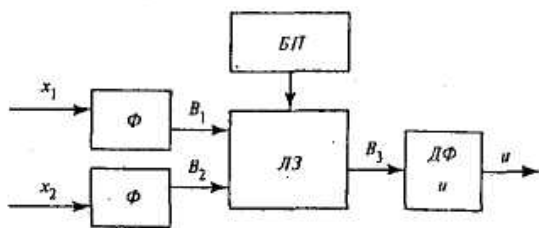
Нечеткое множество представляет собой совокупность элементов произвольной природы, относительно которых нельзя с полной определенностью утверждать, принадлежит ли тот или иной элемент рассматриваемой совокупности. Формально нечеткое множество  $A$  определяется как множество упорядоченных пар или кортежей вида  $\langle x, \mu_A(x) \rangle$ , где  $x$  является элементом некоторого универсального множества, или универсума,  $E$ , а  $\mu_A(x)$  – функция принадлежности, которая ставит каждому из элементов  $x$  универсального множества некоторое действительное число из интервала  $[0, 1]$ . При этом  $\mu_A(x) = 1$  означает, что элемент  $x$  из  $E$  определенно принадлежит нечеткому множеству  $A$ , а значение  $\mu_A(x) = 0$  означает, что элемент  $x$  из  $E$  определенно не принадлежит нечеткому множеству  $A$ .

С помощью нечеткой логики обрабатывают неопределенные данные и ситуации, используя ассоциативные понятия человека – лингвистические термины [5, 6, 7, 10].

Разработка и применение систем нечеткого вывода включают в себя ряд этапов, которые выполняются с помощью основных положений нечеткой логики. Нечеткий вывод характеризуется следующими этапами (см. рисунок):

1. Формирование базы правил *БП* систем нечеткого вывода, предназначенной для формального представления эмпирических знаний или знаний экспертов в проблемной области. В системах нечеткого вывода используются пра-

вила, в которых условия сформулированы в терминах нечетких лингвистических высказываний.



Структура системы нечеткого вывода:  $x_1, x_2$  – входные переменные;  $B_1, B_2$  – входные нечеткие переменные;  $B_3$  – выходная нечеткая переменная;  $u$  – выходная переменная

2. Фаззификация  $\Phi$  входных переменных, представляющая собой процедуру нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных (четко определенных) исходных данных. Целью этапа фаззификации является установление соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей значения входной лингвистической переменной.

3. Операции блока логического заключения ЛЗ, выполняющего функции, аналогичные функциям вычислительного устройства в классической системе регулирования, и определяющего степень истинности условий по каждому из правил, хранящихся в БП.

4. Дефаззификация ДФ выходных переменных в системах нечеткого вывода, представляющая собой процедуру или процесс нахождения обычного (четко определенного) значения для каждой из выходных лингвистических переменных. Цель дефаззификации заключается в том, чтобы, используя результаты логического заключения, получить значение каждой из выходных переменных, которое может быть использовано специальными устройствами, внешними по отношению к системе нечеткого вывода [10].

**Особенности формирования нечетких логических регуляторов.** Так же, как в основе четких множеств лежит четкая логика, в случае нечетких множеств существует нечеткая логика. В случае двuzначной четкой логики существуют полные системы, образуемые операциями НЕ, И, ИЛИ. С их помощью можно записать все другие логические операции. Но в случае нечеткой логики можно создать неограниченное количество операций. Наиболее важными являются расширения операций НЕ, И, ИЛИ. Эти расширения соответственно называются нечетким отрицанием, t-нормой и s-нормой. Более подробно данные вопросы рассмотрены в [7].

Основанные на этой теории методы построения математических моделей расширяют области применения компьютеров и образуют новое направление научно-прикладных исследований – нечеткое моделирование.

Процесс нечеткого моделирования представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов, причем каждый из этапов выполняется с целью построения и использования нечеткой модели системы для решения исходной проблемы. В общем случае под нечеткой моделью понимается информационно-логическая модель системы, построенная на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики.

Таким образом, процесс нечеткого моделирования можно разделить на следующие этапы:

1. Анализ проблемной ситуации.
2. Структуризация предметной области и построение нечеткой модели.
3. Выполнение вычислительных экспериментов с нечеткой моделью.
4. Применение результатов вычислительных экспериментов.
5. Коррекция и доработка нечеткой модели.

Современной промышленностью производится множество различных нечетких логических регуляторов (НЛР) для целей автоматизации производственных процессов. Для программирования этих регуляторов (контроллеров) существует специальный язык – язык нечеткого управления. Его возможности подробно описаны в статье Деменкова «Язык нечеткого управления» [6]. Язык нечеткого управления (Fuzzy Control Language – FCL) разработан для представления нечетких моделей систем управления, в частности, моделей промышленных логических контроллеров (ПЛК) в форме структурируемого текста, который может быть интерпретирован как программа на языке высокого уровня.

Под нечетким управлением (Fuzzy Control) понимается область применения общей методологии теории нечетких множеств и нечеткой логики для решения практических проблем управления. Нечеткое управление возникло как технология, способная расширить возможности автоматизации производства и предназначенная для решения прикладных задач в области управления, которые в общем случае могут быть реализованы с помощью ПЛК.

Нечеткое управление базируется на использовании не столько аналитических или теоретических моделей, сколько на практическом применении знаний, которые можно представить в форме баз правил. Нечеткое управление может использоваться в том случае, когда существует определенный опыт экспертов и его можно записать некоторым формальным образом. Широкий диапазон приложений и естественного подхода, основанного на опыте специалистов, делает нечеткое управление основным средством, которое в качестве стандарта должно стать доступным для всех пользователей ПЛК. Нечеткое управление может также непосредственно комбинироваться с классическими методами управления.

Применение нечеткого управления может быть наиболее эффективно в тех случаях, когда отсутствует явная модель процесса или аналитическая модель является слишком сложной для представления или получения решения в реальном масштабе времени. Другим преимуществом нечеткой логики является возможность непосредственного объединения опыта нескольких специалистов. Нечеткое управление, являясь многозначным управлением, больше ограничивается значениями высказываний «истина» или «ложь». Эта особенность делает нечеткое управление адекватным средством для моделирования эмпирического опыта экспертов, оперируя теми понятиями, в терминах которых формируются управляющие воздействия на заданном множестве входов.

**Сравнение нечетких регуляторов с классическими.** В литературе приведены нечеткие реализации классических ПИ- и ПИД-законов регулирования [9, 11, 12, 13, 17].

Традиционные автоматизированные системы управления сравнивались с нечеткими системами управления многими авторами. Например, в работе С.В. Фролова, И.А. Елизарова и С.А. Лоскутова [17] проведено сравнение трех моделей систем автоматического регулирования (САР) для объекта регулирования с передаточной функцией

$W(p) = \frac{15 \cdot e^{-2p}}{10p + 1}$ : модели

релейно-импульсной САР, модели САР с пропорционально-дифференциальным (ПД) звеном и модели САР с блоком нечеткого вывода (нечеткой САР). Полученные авторами результаты показали, что нечеткая САР не уступает по качеству регулирования САР, реализуемой традиционным способом. В качестве преимущества нечеткого регулирования было отмечено то, что при наличии современных систем программирования ПЛК со встроенными библиотеками нечеткого управления, имеющих хороший графический интерфейс, очень легко и наглядно представляется и корректируется вид функций принадлежности и нечеткого вывода. Следовательно, упрощается и настройка САР.

В работе М.А. Панько [11] рассматриваются особенности нечетких алгоритмов регулирования и обусловленные ими отличия динамики автоматических систем регулирования с классическими и нечеткими алгоритмами. Моделирование проводилось в среде MathLab Simulink. В результате были сделаны следующие выводы:

1. Система с фазы-алгоритмом нелинейна и вид переходных процессов в АСР зависит от формы и размера возмущающего воздействия.

2. При малых, ограниченных по модулю и скорости изменения значениях сигнала рассогласования нечеткий и классический ПИ-алгоритмы в динамическом отношении эквивалентны.

3. При превышении сигналом рассогласования или его приращения пределов нормированного диапазона проявляется эффект насыщения – фазы-алгоритм становится существенно нелинейным.

4. Фазы-реализации ПИ- и ПИД-алгоритмов при подборе параметров позволяют получить работоспособную систему, но оптимальное решение задач минимизации ошибки регулирования при действии возмущений и перевод системы в другое состояние они не обеспечивают.

В статье И.П. Шанцевой [18] рассмотрены структуры регуляторов электрических печей сопротивления на основе нечеткой логики. Показатели качества и точности регулирования разработанных моделей сравнивались с аналогичными показателями ПИД-регулятора. На основе математической модели была доказана возможность реализовать фазы-алгоритм управления и обеспечить желаемый переходный процесс изменения температуры. Исследования показали, что нечеткий регулятор обеспечивает более высокое качество регулирования температуры, чем ПИД-регулятор.

В работе А.А. Коростелева [19] производится сравнение ПИ-регулятора с нечетким регулятором. Сравнительный анализ систем проводился для модели объекта регулирования с передаточной функцией вида

$W(p) = \frac{K}{T_1^2 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1}$ . Сравнительный анализ

качества регулирования проводился при возмущениях, идущих по каналам задания, регулирования и параметрического возмущения. Качество регулирования определялось по следующим характеристикам: динамической ошибке, степени затухания, времени регулирования. Полученные в работе результаты показали, что система с нечетким регулятором превосходит систему с ПИ-регулятором по быстродействию. Динамическая ошибка системы с нечетким регулятором незначительно отличается от динамической ошибки системы с ПИ-регулятором. Исследования, проведенные А.Г. Владыко, показали, что нечеткое регулирование может применяться для управления барабанным котлом-агрегатом и обладает большим быстродействием, по сравнению с регулированием по ПИ-закону [8].

**Применение нечеткого управления.** В [8] проведен глубокий анализ возможностей и перспектив использования нечеткой логики на примере автоматизации энергоблока 600 МВт с барабанным котлом. Нечеткая логика была использована для анализа поведения уровня в барабанном котле и для регулирования температуры пара. Приведены сравнительные результаты поддержания температуры острого пара при использовании ПИД-регулятора (точность поддержания  $\pm 5^\circ\text{C}$ ), динамической модели объекта ( $\pm 3^\circ\text{C}$ ) и нечеткого контроллера ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Практическая ценность полученных результатов

может быть оценена следующим образом: повышение уровня поддерживаемой температуры пара на  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  дает экономию условного топлива 60 т у.т/год.

Таким образом, нечеткое регулирование превосходит традиционное по ряду характеристик. Развитие промышленности и производства нечетких логических контроллеров является хорошей почвой для развития нечеткого регулирования. Системы искусственного интеллекта на базе нечеткой логики широко применяются в современной бытовой технике. В [10, 13, 14, 17, 20] приведены примеры применения нечеткого регулирования в различных технических системах, таких как система поддержания уровня жидкости в баке, система управления параметрами парового котла и др. В [20] предложен пример использования нечеткой логики для управления параметрами котла с ЦКС.

### Заключение

Нечеткие регуляторы могут использоваться как самостоятельно для регулирования параметров процесса, так и в составе традиционных ПИ- и ПИД-регуляторов для улучшения их характеристик.

Поэтому нечеткие автоматизированные системы управления имеют хорошие перспективы внедрения в промышленность для автоматизации теплоэнергетических процессов, в частности, при создании систем управления установок с новыми технологиями (ЦКС), регулировании частоты и активной мощности, и др.

### Список литературы

1. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат И.И. Теория моделей в процессах управления. Информационный и термодинамический аспекты. – М.: Наука, 1978.
2. Тверской Ю.С. Автоматизация котлов с пылесистемами прямого вдувания. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
3. Тверской Ю.С., Таламанов С.А. О новом классе АСУТП, оснащаемых математическими моделями управляемого технологического оборудования // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – № 8. – С. 31–33.

*Новиков Станислав Иванович,*  
Новосибирский государственный технический университет,  
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,  
телефон (4932) 26-97-57,  
e-mail: tverskoy@su.ispu.ru

*Шахнович Вадим Рувимович,*  
Новосибирский государственный технический университет,  
аспирант кафедры тепловых электрических станций,  
телефон (4932) 26-97-57,  
e-mail: tverskoy@su.ispu.ru

*Сафронов Антон Валерьевич,*  
Новосибирский государственный технический университет,  
студент  
телефон (4932) 26-97-57,  
e-mail: tverskoy@su.ispu.ru

4. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивно-го управления: учебник / под ред. Н.Д. Егупова. – М: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.

5. **Zadeh L.A.** From computing with numbers to computing with words – from manipulation of measurement to manipulation of perceptions – IEEE Trans. On Circuits and Systems -1: Fundamental Theory and Applications, 45, 1, 1999, 105–119.

6. **Деменков Н.П.** Язык нечеткого управления // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 5. – С. 30–36.

7. **Тэрано Т., Асаи К., Сугено М.** Прикладные нечеткие системы / пер. с японского Ю.Н. Чернышова. – М.: Мир, 1993.

8. **Владыко А.Г.** Разработка и исследование моделей систем управления параметрами котлоагрегата на основе математического аппарата теории нечетких множеств: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.18. – Комсомольск-на-Амуре, 2000.

9. **Arroyo-Figueroa G., Sucar L. E., Villavicencio A.** Fuzzy intelligent system for the operation of fossil power plants // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2000. –Vol. 13. – № 4. – P. 431–439.

10. **Деменков Н.П.** Нечеткое управление в технических системах: учеб. пособие. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.

11. **Панько М.А., Аракелян Э.К.** Особенности нечетких алгоритмов регулирования в сравнении с классическими // Теплоэнергетика. – 2001. – № 10. – С. 39–42.

12. **Ротач В.Я.** О фазы-ПИД регуляторах // Теплоэнергетика. – 1999. – № 8. – С. 32–36.

13. **Pivonka and Blaha.** Comparative Analysis of Classical and Fuzzy PID Control Algorithms // Proceedings of 7<sup>th</sup> Zittau fuzzy colloquium. – Germany, 1999. – P. 176–181.

14. **Splithoff H., Klefeur G., Nicolai W., Trautmann G.** Erfahrungen und Ergebnisse mit dem Zustandsregler für die Frischdampfdruckregelung eines 2250 t/h Dampferzeugers // BWN 10. – 1986.

15. **Новиков С.И.** Оптимизация автоматических систем регулирования теплоэнергетических процессов. Ч. 1. Методы определения оптимальных параметров настроек регулирующих устройств. – Новосибирск: НГТУ, 2006.

16. **Олсон Г., Пиани Дж.** Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский Диалект, 2001.

17. **Фролов С.В., Елизаров И.А., Лоскутов С.А.** Реализация нечеткого импульсного регулятора // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – № 1. – С. 23–25.

18. **Шанцева И.П.** Фаззи-регулятор температуры электрических печей сопротивления // Вестник МЭИ. – 2008. – № 3. – С. 51–56.

19. **Коростелёв А.А.** Сравнительный анализ функциональных возможностей интеллектуальных нечетких и ПИ-регуляторов: мат-лы конф. «Первый открытый конкурс молодых специалистов ЗАО «СибКОЭС». – Томск: ТПУ, 2008.

20. **Karppanen E.** Advanced control of an industrial circulating fluidized bed boiler using fuzzy logic. – Oulu: Oulun Yliopisto, 2000.