

# Методы синтеза нечеткого регулятора с двойной базой правил

К.А. Соловьёв  
Филиал в г. Салават  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Салават, Россия  
e-mail: vecarc@mail.ru

Е.А. Муравьева  
Филиал в г. Стерлитамак  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Стерлитамак, Россия  
e-mail: muraveva\_ea@mail.ru

## Аннотация<sup>1</sup>

Для повышения точности нечеткого регулятора была разработана структура нечеткого регулятора с двойной базой правил. В статье рассматриваются два метода синтеза нечеткого регулятора с двойной базой правил, которые отличаются требованиями к исходным данным.

## 1. Введение

Наиболее поразительным свойством человеческого интеллекта является способность принимать правильные решения в обстановке неполной и нечеткой информации. Построение моделей приближенных рассуждений человека и использование их в компьютерных системах будущих поколений представляет сегодня одну из важнейших проблем науки [1].

В настоящее время нечеткая логика рассматривается как стандартный метод проектирования и получила широкое признание среди инженеров и проектировщиков. Нечеткая логика оказалась превосходным инструментом для разработки систем управления внутренними компонентами персональных компьютеров, а также алгоритмов компрессии речи и видео.

## 2. Постановка задачи

Основными достоинствами нечеткого регулятора являются возможность использования экспертных знаний в явном виде, высокое быстродействие, реализация плавных многомерных существенно нелинейных зависимостей.

Нечеткий регулятор представляет собой многомерное нелинейное статическое звено. Для синтеза нечеткого регулятора достаточно определить его желаемую статическую характеристику и настроить его таким

образом, чтобы она совпадала с желаемой [2 – 4]. При этом возникает проблема, так как нечеткий регулятор не является точным. Для решения данной задачи был разработан нечеткий регулятор с двойной базой правил.

В связи с изменением структуры нечеткого регулятора возникла задача разработки алгоритма его синтеза. В данной статье рассматриваются два алгоритма синтеза нечеткого регулятора: синтез по опорным точкам и обучение нечеткого регулятора.

## 3. Нечеткий регулятор с двойной базой правил

Нечеткий регулятор с двойной базой правил можно представить в виде двух классических нечетких регуляторов, которые используют одни и те же лингвистические переменные. При этом статическая характеристика одного из них всегда находится чуть ниже желаемой, а второго – чуть выше. Данные нечеткие регуляторы можно мысленно представить в виде «экспертов», один из которых всегда приуменьшает управляющее воздействие, а второй всегда его немного преувеличивает. Если рассматривать данных «экспертов», находясь на желаемой статической характеристике, то они находятся на противоположных сторонах. «Эксперты» начинают «спорить», в результате они придут к решению, которое будет ближе каждого из них к желаемому значению. Если ввести в систему «арбитра», то в процессе «спора» он начнет доверять одному из «экспертов» больше, в результате правильной работы «арбитра» «эксперты» придут к желаемому решению. В качестве «арбитра» можно использовать веса отдельных правил.

В результате при сохранении высокой производительности можно получить нечеткий регулятор с точностью обусловленной вычислительной системой, на которой он выполняется. Это новое качество можно объяснить через закон диалектики единства и борьбы противоположностей. Единство заключается в единой структуре, цели, входных данных, близким

---

Труды четвертой международной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 17 - 19 мая, Уфа, Россия, 2016

результатом. Борьба противоположностей заключается в том, что каждая база правил перетягивает результат на свою сторону от желаемого значения.

#### 4. Синтез нечеткого регулятора по опорным точкам

Синтез нечеткого регулятора с заданной статической характеристикой можно разделить на следующие этапы [5 – 9]:

1. формирование лингвистических переменных входных и выходных сигналов;
2. выбор алгоритмов дефаззизации, агрегирования, активизации и аккумуляирования;
3. синтез системы продукционных правил.

Формирование лингвистических переменных, выбор алгоритмов агрегирования, аккумуляирования и дефаззификации определяется экспертом на основании характеристик объекта управления, личного опыта и предпочтений эксперта и описывается в литературе [5 – 10].

Исходными данными при проектировании нечеткого регулятора с двойной базой правил являются желаемая статическая характеристика, диапазон изменений входных и выходных сигналов. Желаемая статическая характеристика представляется в виде таблицы опорных точек.

Получение желаемой статической характеристики можно разделить на следующие этапы:

1. определение диапазонов изменения входных переменных нечеткого регулятора;
2. разбиение диапазонов изменения на интервалы путем выбора 5 – 7 значений входных переменных;
3. для всех возможных комбинаций необходимо определить желаемое значение выхода нечеткого регулятора.

Связи входных значений с желаемого значения выхода называется опорной точкой.

Для описания входных лингвистических переменных используются термы треугольной формы, вершина которых размещается в опорной точке, а основание расположено между двумя ближайшими опорными точками.

Рассмотрим алгоритм синтеза нечеткого регулятора по опорным точкам для двух переменных. Обозначим точки максимума функций принадлежности всех термов входных лингвистических переменных  $t_{Ti}$  и  $p_{Pi}$ . При значениях входов  $t=x_{Ti}$  и  $p=x_{Pi}$  по желаемой статической характеристике определяем значение выходной величины  $v_{ij}$ . Полученные значения заносим в таблицу опорных точек (таблица 1). По

таблице опорных точек происходит синтез системы продукционных правил.

Таблица 1. Таблица опорных точек

t \ P	$P_{P_1}$	$P_{P_2}$	...	$P_{P_j}$	...	$P_{P_m}$
$t_{T_1}$	$v_{11}$	$v_{12}$	...	$v_{1j}$	...	$v_{1m}$
$t_{T_2}$	$v_{21}$	$v_{22}$	...	$v_{2j}$	...	$v_{2m}$
...	...	...	...	...	...	...
$t_{T_i}$	$v_{i1}$	$v_{i2}$	...	$v_{ij}$	...	$v_{im}$
...	...	...	...	...	...	...
$t_{T_n}$	$v_{n1}$	$v_{n2}$	...	$v_{nj}$	...	$v_{nm}$

Пусть для термов  $T_1...T_i$  были разработаны продукционные правила. Рассмотрим синтез продукционных правил для термина  $T_{i+1}$ .

Если изменять термы входных и выходных лингвистических переменных, то разработанные ранее продукционные правила будут давать другой результат. Таким образом, при синтезе продукционных правил необходимо считать термы всех лингвистических переменных неизменными. Это существенно облегчит задачу синтеза нечеткого регулятора.

При подаче на вход нечеткого регулятора значений максимумов термов входных лингвистических переменных сработает только одно продукционное правило [1 – 3]. Таким образом, нечеткий регулятор в данной точке можно рассматривать как нечеткий регулятор с одним правилом, следовательно, консеквент правила вида  $v = V_u$  полностью определяет выходное значение регулятора.

В общем случае, при значениях  $u=1, 2, \dots, q$  значение выхода не будет принимать требуемого желаемого значения из таблицы опорных точек.

Обозначим центры тяжести всех термов выходной лингвистической переменной  $M_j$ . Пусть желаемого значение  $v_{ij}$  лежит между центрами тяжести термов  $M_g$  и  $M_{g+1}$ .

При консеквенте продукционного правила  $v = V_g$  результат будет меньше желаемого, а при  $v = V_{g+1}$  – больше желаемого.

Создадим два продукционных правила

$$\text{Если } t=T_i \text{ и } p=P_j \text{ Тогда } v = V_g$$

$$\text{Если } t=T_i \text{ и } p=P_j \text{ Тогда } v = V_{g+1}$$

Будем называть базовым консеквент со степенью истинности 1. Консеквент со степенью истинности меньше 1 называется дополнительным.

Введем обозначение  $C$  – степень истинности дополнительного консеквента. Определение степени истинности  $C$  производится по графику (рисунок 1). Для идентификации дополнительного консеквента

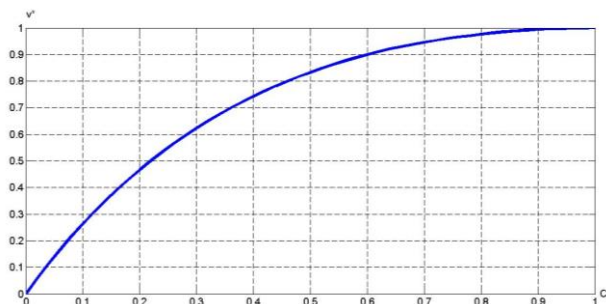
необходимо рассчитать значение выхода нечеткого регулятора  $v_{\Sigma}$  при  $C = 1$ . Базовый консеквент  $v = V_b$ . Если значение  $v_{\Sigma}$  больше желаемого, то  $b = g$ . Если меньше –  $b = g + 1$ .

Величина относительного значения выходной величины  $v^*$  рассчитывается по следующей формуле:

$$v^* = 1 - \frac{v_{ij} - v_{\Sigma}}{M_b - v_{\Sigma}} \quad (1)$$

Так как antecedentes обоих баз правил идентичны, то возможно объединение правил в одно:

Если  $t=T_i$  и  $p=P_j$  Тогда  $v = V_g$  и  $v = V_{g+1}^C$



**Рисунок 1. Зависимость степени истинности правила от относительного значения выходной величины**

Остальные продукционные правила определяются аналогично.

Так как алгоритм синтеза нечеткого регулятора не зависит от количества входов и последовательности разработки продукционных правил, то статическая характеристика во всех направлениях будет иметь одинаковые свойства. Выходы в нечетком регуляторе независимы, поэтому данный алгоритм можно применять независимо от количества выходов.

## 5. Обучение нечеткого регулятора как метод синтеза

Если по каким-то причинам таблица опорных точек не может быть получена, то можно воспользоваться универсальным алгоритмом синтеза нечеткого регулятора, основанного на его обучении. В данной работе предлагается алгоритм обучения нечеткого регулятора путем изменения консеквентов продукционных правил.

В качестве алгоритма обучения выбран алгоритм градиентного спуска. В качестве исходной точки для алгоритма градиентного спуска можно взять нечеткий регулятор Мамдани.

Пусть нечеткий регулятор имеет  $k$  продукционных правил. Так как нечеткий регулятор имеет две базы продукционных правил, то в процессе обучения необходимо разработать  $2k$  консеквентов.

Продукционное правило с двойным консеквентом имеет вид:

ЕСЛИ <условие> ТОГДА <консеквент 1> И <консеквент 2><sup>C</sup>

Консеквент 1 является базовым и имеет степень истинности единицу, а консеквент 2 является дополнительным и имеет степень истинности  $C$ . При этом термы выходной лингвистической переменной консеквента 1 и 2 обязательно пересекаются, т.е. являются соседними.

Если обозначить целым числом  $N$  «левый» из термов, используемых в консеквентах продукционного правила, то «правый» терм будет иметь номер  $(N + 1)$ .

Введем обозначение:

$$W = N + v, \quad (2)$$

где  $W$  – характеристика продукционного правила;

$v$  – число определяемая по формуле:

$$v = \frac{c + r}{2}, \quad (3)$$

где  $r = 1$ , если в консеквенте используется «правый» терм, и  $r = 0$ , если «левый» терм.

По характеристике продукционного правила легко восстановить оба консеквента. При ее изменении происходит последовательный переход термов как в базовом, так и в дополнительном консеквентах, обеспечивающий монотонное изменение четкого значения выходной переменной.

Под обучением нечеткого регулятора второго порядка в данной работе понимается подбор характеристик продукционных правил  $W_i$ .

Так как в нечетком регуляторе одновременно срабатывают несколько продукционных правил, то необходимо одновременно изменять несколько характеристик продукционных правил  $W_i$ . Обозначим результат процедуры агрегирования подусловий базы продукционных правил как  $Z_i$  и ошибку вывода  $E$ . Метод градиентного спуска с шагом  $h$  для обучения нечеткого регулятора второго порядка можно описать уравнением:

$$\Delta W_i = E \cdot Z_i \cdot h \quad (4)$$

Предложенный алгоритм обучения обеспечивает высокую точность настройки регулятора [4].

## 6. Заключение

Разработанная модель нечеткого регулятора с двойной базой правил позволяет, оперируя качественными знаниями экспертов, получить точную систему управления.

В статье рассмотрены два метода синтеза нечеткого регулятора. Первый синтез требует от эксперта или оператора системы заполнения таблицы опорных точек. Данный этап является наиболее трудоемким и не всегда возможен. Но построение таблицы опорных точек позволяет существенно упростить синтез

нечеткого регулятора. Алгоритм обучения нечеткого регулятора позволяет его настроить на произвольном наборе исходных данных.

### Список используемых источников

1. Муравьева Е.А., Соловьев К.А., Султанов Р.Г., Соловьева О.И. Синтез нечеткого регулятора с заданной многомерной статической характеристикой // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2015. №1. С.245-260.
2. К.А. Соловьев, Е.А. Муравьева Синтез эталонной модели для системы управления технологическим процессом на базе нечеткого регулятора второго порядка. *Авиакосмическое приборостроение*. М.: Научтехиздат, 2015 г. №10 С. 42-46.
3. Соловьев К.А., Муравьева Е.А., Султанов Р.Г., Соловьева О.И. Синтез нечеткого регулятора для управления соотношением расходов «газ – воздух» на основе режимной карты // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2015. №1. С.275-291.
4. Соловьёв К.А., Муравьева Е.А., Султанов Р.Г. Обучение нечеткого регулятора второго порядка // *Сборник материалов I Международной научно-технической конференции «Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве»*. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2016 .– 438 с.
5. Алиев Р.А. и др. Управление производством при нечеткой исходной информации М.: Энергоатомиздат, 1991,– 240 с.: ил.
6. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. К.: Радиоамтор, 2008,– 972 с.
7. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под редакцией Т. Терано, К. Асаи, М. Сугено.– М.: Мир, 1993.– 368 с., ил.
8. Сахнюк П.А. Интеллектуальные системы и технологии: Учебное пособие.– Ставрополь: Агрус, 2012.– 228 с.
9. Соловьев К.А., Адаптация нечеткого регулятора./ К.А. Соловьев, Е.А. Муравьева, Р.Г. Султанов // *Нефтегазовое дело*. Том 12 №3. 2014.– С. 123-128.
10. Управление технологическими процессами, реализованное на четких логических регуляторах / М. Б. Гузаиров, Е. А. Муравьева. М.: Машиностроение, 2012. – 305 с.