

Сложные технические системы с изменяющимися в широком диапазоне и с большой скоростью динамическими характеристиками требуют особого управления.

В этих случаях часто невозможно обеспечить автоматическое управление объектом во всех его режимах работы без изменения настройки или схемы управляющего устройства. Для автоматического выполнения этой задачи используются адаптивные системы управления.

В данной работе рассматриваются методы адаптации нечеткого регулятора. Алгоритм работы нечеткого регулятора разрабатывается экспертом. При этом каждый эксперт, независимо от выбранной методики синтеза нечеткого регулятора, выполняет эту операцию индивидуально: со своей формой термов, их диапазонами и количеством, базой продукционных правил. Следовательно, в большинстве случаев система управления изначально не будет оптимальной. Если учесть изменяющиеся внешние условия и свойства объекта управления, то система адаптации нечеткого регулятора будет необходима для качественного управления.

В работе также разработана модель желаемого поведения, которая в отличие от эталонной модели, использует, кроме задающего воздействия, выходные координаты объекта управления. Предложенные методы с использованием модели желаемого поведения адаптируют фаззификатор и систему продукционных правил нечеткого регулятора и позволят значительно сократить время адаптации регулятора.

Рассмотренные методы адаптации позволяют разрабатывать сколь угодно сложные системы управления. При этом трудоемкость синтеза не увеличивается, так как происходит адаптация и самоорганизация нечеткого регулятора.

Complicated technical systems with varying over a wide range and a high speed dynamic characteristics require special management.

In these cases it is often impossible to provide automatic control of an object in all its modes of operation without changing the configuration or the control circuit devices. To automatically perform this task using adaptive control systems.

This paper discusses the methods of adaptation fuzzy controller. The algorithm works fuzzy controller is developed by an expert. In addition, each expert, regardless of the chosen method of synthesis of fuzzy controller, performs this operation alone: with his form of terms, their ranges and the amount base of production rules. Consequently, in most cases, the control system initially will not be optimal. Taking into account the changing external conditions and the properties of the control, the system adaptation fuzzy controller is needed for good governance.

The paper also developed a model of the desired behavior, which is in contrast to the standard model, uses other than the reference variable, the output coordinates of the control object. The proposed methods using a model of the desired behavior of the system and adapt fazzifikator production rules fuzzy controller and will significantly reduce the time controller adaptation.

The methods considered for adaptation allow you to develop arbitrarily complex control systems. In this case, the complexity of the synthesis is not increased, as is the adaptation and self-organizing fuzzy controller.

Соловьев К.А., Муравьева Е.А., Султанов Р.Г.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», филиал, г. Ишимбай, Российская Федерация

K.A. Solovyov, E.A. Muraveva, R.G. Sultanov

FSBEI HPE «Ufa State Aviation Technical University», branch Ishimbay, the Russian Federation

**Ключевые слова:** нечеткая логика, нечеткое управление, адаптация регулятора, интеллектуальное управление, модель желаемого поведения, фаззификация, база продукционных правил.

**Key words:** fuzzy logic, fuzzy control, the adaptation controller, intelligent control, model the desired behavior, fuzzification, the base of production rules.

### 1 Введение

Нечеткие регуляторы осуществляют выработку управляющих сигналов, основанных на применении нечеткой логики. Понятие нечеткой логики введено математиком Л.А. Заде, который предложил теорию нечетких множеств, на основе которой можно строить нечеткие аналоги всех математических

понятий и создавать необходимый формальный аппарат для моделирования человеческих рассуждений и человеческого способа решения задач [1]. Представление информации в подобном виде называется экспертной информацией.

Нечеткий регулятор состоит из трех основных частей: фаззификатор, модуль нечеткого вывода, дефаззификатор. Фаззификатор и дефаззификатор осуществляют преобразования из четких значений переменных в нечеткие (в виде лингвистических переменных) и обратно. Модуль нечеткого вывода на основе экспертной информации осуществляет формирование нечетких выходных переменных [3].

Нечеткие регуляторы обеспечивают желаемую переходную характеристику системы управления

технологическим процессом лишь при стабильных значениях параметров объекта управления [2]. Для сохранения заданного качества процессов управления при изменении параметров объекта необходимо адаптировать регулятор [4].

## 2 Постановка задачи

Алгоритм работы фаззификатора разрабатывается экспертом, т.е. эксперт для каждого входного параметра определяет группу термов (количество, формы кривых принадлежности). При этом каждый эксперт выполнит эту операцию индивидуально: со своей формой термов, их диапазонами и количеством. Таким образом, у каждого эксперта свои критерии оптимальности процесса фаззификации. Следовательно, необходимо адаптировать фаззификатор для достижения оптимального регулирования [5]. В данном случае предлагается провести адаптацию за счет изменения процедуры нечеткого вывода в режиме реального времени.

Управление на базе нечеткой логики предназначено для объектов, которые плохо поддаются математическому описанию. Следовательно, эксперт формирует алгоритм процесса нечеткого вывода, который не всегда реализует устойчивое управление технологическим процессом, близкое к оптимальному. Таким образом, система адаптации требуется и для системы производственных правил.

Дефаззификация, хотя и имеет большой разброс четкой величины в зависимости от выбранного метода, остается неизменной в процессе работы регулятора, так как система адаптации будет подстраивать фаззификатор и систему производственных правил под текущий метод дефаззификации. Следовательно, дефаззификатор можно считать неизменным звеном системы, не требующим адаптации.

## 3 Структурная схема системы адаптации нечеткого регулятора

Структурная схема системы адаптации представлена на рисунке 1. Задающее воздействие  $g(t)$  подается на регулятор и статическую или динамическую модель желаемого поведения объекта управления. Сигналы с модели  $y_{ж}(t)$ , регулятора  $u(t)$  и объекта управления  $y(t)$  подаются на вход системы адаптации. На основании желаемого  $y_{ж}(t)$  и действительного  $y(t)$  поведения объекта управления, регулирующего воздействия  $u(t)$  вырабатывается сигнал адаптации  $s(t)$ .

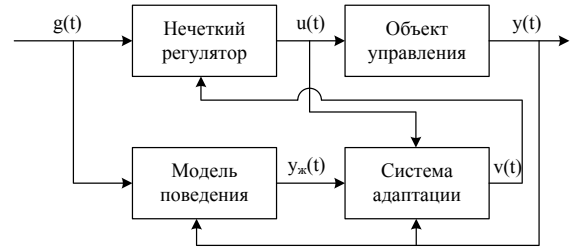


Рисунок 1. Структурная схема адаптации нечеткого регулятора

## 4 Модель желаемого поведения

Модель желаемого поведения объекта управления от эталонной модели отличается тем, что модель желаемого поведения представляет собой статическое звено, на входы которого дополнительно подаются производные по времени сигналов состояния объекта управления и задающего воздействия.

Для того чтобы избежать перерегулирования при адаптации регулятора, необходимо после каждого шага устанавливать желаемую модель регулятора в состояние, соответствующее объекту управления. В зависимости от объекта управления и модели желаемого поведения возможно изменение только статических параметров состояния или статических и динамических. На рисунке 2 приведено графическое пояснение к корректировке состояния модели. Если отключить данную корректировку, то поведение объекта управления будет рассогласованно во времени с моделью поведения. Накопленная ошибка не будет характеризовать текущее отклонение в динамике, а будет лишь суммарной ошибкой, характеризующий не текущее отклонение поведения, а отклонение поведения объекта управления от прогнозируемого. Таким образом, для наиболее точной и быстрой адаптации нечеткого регулятора необходимо постоянно подстраивать состояние модели поведения объекта управления.

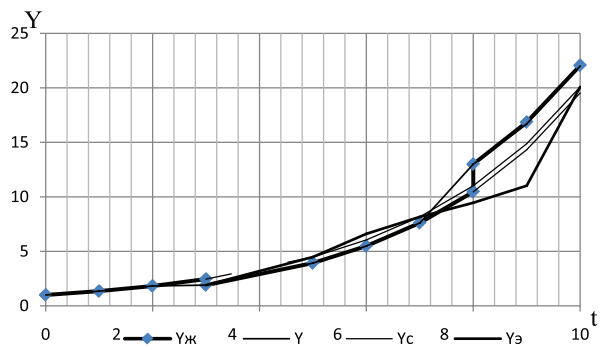


Рисунок 2. Подстройка модели желаемого поведения

Как видно из рисунка 2, на интервале  $t = 2 \div 3$  состояние объекта управления (кривая  $Y$ ) отклонилось от желаемого состояния (кривая  $Y_{ж}$ ). Чтобы сохранить динамику поведения объекта

управления и адаптацию регулятора к ней, состояние модели желаемого поведения изменяется на  $t=3$  к действительному поведению объекта. На участке  $t=3,5$  объект управления повторяет форму первоначальной желаемой кривой с некоторым отставанием во времени. На участке  $t=8\div 10$  объект управления будет сохранять форму желаемой кривой, двигаясь с опережением. Такая подстройка модели позволяет адаптировать регулятор к ошибкам, сделанным на предыдущем шаге управления более точно. В случае нескорректированной модели система управления считала бы, что адаптация необходима на участке  $t=2\div 10$ . Адаптация может раскатать объект управления, т.е. вывести его из устойчивости. Например, при  $t=3$  адаптация регулятора, необходимая чтобы вывести объект управления на кривую желаемого поведения при  $t=4$ , при  $t=5$  подаст управляющий сигнал, который переведет объект управления (кривая  $Y_э$ ) на другую сторону от первоначальной желаемой кривой (кривая  $Y_с$ ). При этом ошибка при  $t=5$  может быть больше первоначальной. Это порождает колебательный процесс вокруг линии желаемого поведения, который может стать неустойчивым. При корректировке модели данная ситуация не возникает. Действительно, адаптация регулятора происходит только при  $t=3$  и  $t=8$ , одновременно с этим происходит и изменение состояния модели поведения.

### 5 Методы адаптации фаззификатора

Для адаптации фаззификатора можно использовать следующие методы:

- изменение границ нечеткости (сдвиг, изменение ширины);
- абстракция термов;
- детерминация термов.

Пусть нечеткая величина задана термами, представленными на рисунке 3. Область изменения входной величины можно условно разделить на участки: четкие и нечеткие. Четкие участки – это те интервалы входной величины, которые однозначно относятся только к одному терму (незаштрихованные области). Нечеткие участки, соответственно, те интервалы, которые относятся к двум и более термам, т.е. функции принадлежности двух и более термов на этих интервалах принимают значения больше нуля (заштрихованные области). Нечеткие участки характеризуются шириной участка  $\lambda_i$  и координатой его середины  $x_i$ . Адаптацию процесса фаззификации целесообразнее проводить не над изменением термов, а над модификацией нечетких участков. Таким образом, первый метод адаптации фаззификатора заключается в подстройке параметров  $\lambda_i$  и  $x_i$  к оптимальным значениям. Кроме того переход к адаптации нечетких участков позволяет сократить количество подстраиваемых параметров.

Пусть для входной переменной активны термы  $T_2(\mu=0,8)$  и  $T_3(\mu=0,2)$  (рисунок 4, а), система адаптации подает сигнал на желаемое значение  $T_2(\mu=0,6)$  и  $T_3(\mu=0,4)$  при неизменной ширине нечеткого участка.

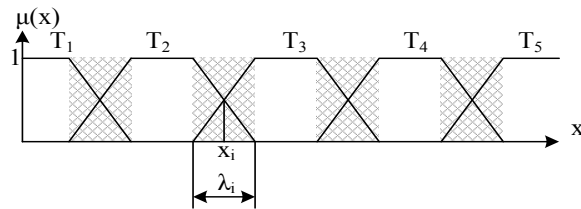


Рисунок 3. Четкие и нечеткие участки

Адаптивный контур сдвинет  $x_2$  таким образом, чтобы получился желаемый результат (рисунок 4, б).

Когда подается сигнал на желаемое значение функций принадлежности термов с изменением ширины нечеткого участка, фаззификатор сначала изменяет ширину участка  $\lambda_i$ , а затем подстраивает регулятор аналогично предыдущему описанию.

Такая подстройка может осуществляться как за одну итерацию, так и за несколько итераций, двигаясь небольшими шагами к желаемому результату.

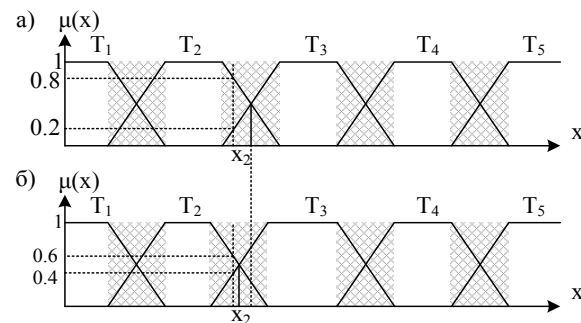


Рисунок 4. Адаптация сдвигом

Абстракция термов – это уменьшение количества термов за счет поглощения одного терма другим. Такое поглощение целесообразно проводить в случае, когда система продукционных правил не различает два и более терма. Это позволит оптимизировать работу регулятора, что снизит требования к аппаратной части системы управления. Будем называть два и более терма неразличимыми, если замена каждого из них на логическую сумму этих термов во всей системе продукционных правил не изменит алгоритм ее функционирования.

Рассмотрим это действие на примере. Пусть имеется следующая система продукционных правил:

- Если  $A=T_{a1}$  то  $B=T_{b1}$   $C=T_{c1}$
- Если  $A=T_{a2}$  то  $B=T_{b1}$   $C=T_{c1}$
- Если  $A=T_{a3}$  то  $B=T_{b2}$   $C=T_{c3}$

Если  $A=T_{a4}$  то  $B=T_{b2}$ ,  $C=T_{c2}$

Как видим, в системе продукционных правил термы  $T_{a1}$  и  $T_{a2}$  неразличимы, так как во всех случаях их употребления консеквенты правил полностью повторяются. Следовательно, можно сократить количество продукционных правил, абстрагируя эти два термина одним общим. Термы  $T_{a3}$  и  $T_{a4}$  не являются неразличимыми, так как замена  $T_{a3}$  на логическую сумму ( $T_{a3}$  ИЛИ  $T_{a4}$ ) породит два противоречивых правила, консеквенты которых будут иметь вид:  $C=T_{c3}$  и  $C=T_{c2}$ . Абстракция в данном случае уменьшит точность и адекватность регулятора.

Функция принадлежности абстрактного термина можно найти по формуле:

$$\mu_{\text{абс}}(x) = \max \{ \mu_1(x); \mu_2(x) \},$$

где  $\mu_{\text{абс}}(x)$  – функция принадлежности абстрактного термина;

$\mu_1(x), \mu_2(x)$  – функции принадлежности исходных термов.

Детерминация термов – процесс, обратный абстракции термов. Детерминация термов позволяет усложнить, сделать более адекватным процесс управления.

Допустим, система адаптации при одинаковых терминах не может найти оптимальное значение и постоянно меняет продукционные правила. При этом можно проследить циклические изменения правил.

Пусть система адаптации нечеткого регулятора не может определиться между двумя правилами:

$$\text{Если } A = T_{a1} \text{ то } B = T_{b1} \quad (1)$$

$$\text{Если } A = T_{a1} \text{, то } B = T_{b2} \quad (2)$$

В одном цикле система адаптации заменяет корректируемое правило на правило (1), считая его верным. В другом цикле система адаптации изменяет его же на правило (2). Этот процесс повторяется циклически. Такие правила назовем спорными. Очевидно, что система адаптации не может различать antecedentes этих правил, необходимо при одном и том же наборе входных термов в одном случае выполнять одно действие, в другом – иное. Таким образом, чтобы избавиться от данной неопределенности, необходимо детализировать терм  $T_{a1}$ , т.е. разбить данный терм на несколько термов. При разбиении термина на несколько появляется возможность избавиться от спорных правил и, благодаря этому, система продукционных правил сможет прийти к установившемуся состоянию.

Функцию принадлежности производных уточняющих термов необходимо подобрать таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$\mu_{\text{исх}}(x) = \max \{ \mu_1(x); \mu_2(x) \},$$

где  $\mu_{\text{исх}}(x)$  – функция принадлежности исходного термина;

$\mu_1(x), \mu_2(x)$  – функции принадлежности детализирующих термов.

Абстракция и детерминация термов, как противоположные понятия, позволяют нечеткому регулятору эволюционировать, адаптироваться. Не изменяя структуры регулятора и не увеличивая требования к аппаратной части, можно получить наиболее адекватную модель управления, т.к. согласно закону диалектики «единства и борьбы противоположностей» нечеткий регулятор будет развиваться, строя свои понятия об объекте управления.

## 6 Методы адаптации базы продукционных правил

Адаптация системы продукционных правил заключается в реализации следующих методов:

- изменение консеквентов продукционных правил;
- адаптация термов выходных величин (аналогично адаптации фаззификатора);
- структурные изменения при абстракции и детерминации термов.

При абстракции термов количество продукционных правил в регуляторе уменьшается за счет удаления дублирующих правил после замены в них неразличимых термов одним абстрактным термом. Действительно, для описания полной модели поведения необходимо меньшее количество правил. Разницу в количестве правил можно найти по формуле:

$$\Delta N = N_0 - N_1 = \prod_i n_i^0 - \prod_i n_i^1, \quad (3)$$

где  $N_0$  – количество правил до абстракции;

$N_1$  – количество правил после абстракции;

$n_i^0$  – количество термов  $i$ -й лингвистической переменной до абстракции;

$n_i^1$  – количество термов  $i$ -й лингвистической переменной после абстракции.

Очевидно, что при абстракции двух термов в  $k$ -й лингвистической переменной справедливы следующие соотношения:

$$\begin{cases} n_i^1 = n_i^0, & \text{если } i \neq k; \\ n_i^1 = n_i^0 - 1 & \text{если } i = k. \end{cases} \quad (4)$$

Разница в количестве правил преобразуется к следующему виду:

$$\Delta N = n_k^0 \prod_{i, i \neq k} n_i^0 - (n_k^0 - 1) \prod_{i, i \neq k} n_i^0 = \prod_{i, i \neq k} n_i^0. \quad (5)$$

При большом количестве лингвистических переменных и термов, описывающих их, эта разница будет иметь существенное значение для снижения требований к аппаратной части. Например, если в условиях продукционных правил используются 4 лингвистические переменные, каждая из которых описывается 5 терминами, то при абстракции двух

термов количество продукционных правил сократится на  $5^3 = 125$  правил.

При детерминации термов количество правил возрастает. При детерминации одного термина в  $k$ -й лингвистической переменной справедливы следующие соотношения:

$$\begin{cases} n_i^1 = n_i^0, & \text{если } i \neq k; \\ n_i^1 = n_i^0 + 1 & \text{если } i = k. \end{cases} \quad (6)$$

Очевидно, что количество продукционных правил возрастает на следующую величину:

$$\begin{aligned} \Delta N &= N_1 - N_0 = \prod_i n_i^1 - \prod_i n_i^0 = \\ &= (n_k^0 + 1) \prod_{i, i \neq k} n_i^0 - n_k^0 \prod_{i, i \neq k} n_i^0 = \prod_{i, i \neq k} n_i^0 \end{aligned} \quad (7)$$

Новые правила необходимо строить следующим образом:

Если правило не является спорным, то оно дублируется для обоих новых термов;

Если правило спорное, то возможны следующие действия:

- выбирается один из консеквентов двух спорных правил и дублируется для обоих новых правил;
- реализуются оба консеквента правил, причем необходимо проанализировать соседние правила, чтобы определить наиболее подходящие соответствия antecedентов и консеквентов правил.

Если производить реализацию спорных правил без анализа соседних продукционных правил, то необходимо каждому правилу присвоить один и тот же консеквент. Таким образом, из этих двух правил только одно будет нуждаться в адаптации.

Изменение действий продукционных правил реализуется заменой термов в правилах на соседние, т.е. на наиболее близкие термы, и перестановкой консеквентов между продукционными правилами.

Рассмотрим процесс изменения продукционных правил. Система адаптации вырабатывает сигнал

желаемого результата. Система нечеткого вывода обрабатывает этот сигнал по следующему алгоритму:

- формирует список желаемых продукционных правил;
- приближает действия выполненных продукционных правил к списку желаемых продукционных правил.

Список желаемых продукционных правил подбирается таким образом, чтобы сформировать требуемый выход. Приближение делается аналогично алгоритму градиентного спуска, т.е. высчитывается направление, в котором необходимо изменить систему продукционных правил. Затем делается шаг в выбранном направлении. Обозначим следующие группы правил: А – правила, функция агрегирования которых больше конечного порогового значения, В – правила, которыми система адаптации желала бы заменить правила группы А. Таким образом, можно рассчитать направления изменения antecedентов или консеквентов продукционных правил А.

## 7 Заключение

Эксперт создает лишь первоначальную элементарную систему нечеткого управления, которая адаптируется к особенностям конкретного объекта управления.

Нечеткий регулятор критически относится к информации, представленной экспертом, что, несомненно, положительно сказывается на процессе управления.

Нечеткий регулятор, постоянно «общаясь» (взаимодействуя) с объектом управления, в конечном результате будет больше знать и лучше понимать его, чем эксперт, разрабатывающий данную систему управления, что дает возможность модифицировать и синтезировать как термы, так и продукционные правила и позволяет строить сколь угодно сложные системы управления.

## СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: Радиомотор, 2008. 972 с.

2 Kevin M. Passino and Stephen Yurkovich, Fuzzy Control, Addison Wesley Longman, Menlo Park CA, 1998. 522 с.

3 Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник / Под ред. Н.Д. Егупова; изд. 2-е, стереотип. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 744с.

4 Управление производством при нечеткой исходной информации / Алиев Р.А. и др. М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.

5 Султанов Р.Г., Соловьев К.А. Алгоритм синтеза адаптивного динамического нечеткого регулятора // Научные технологии в машиностроении: материалы / Всерос. науч.-практ. конф. (г. Ишимбай, 17–18 мая 2013 г.). Уфа: УГАТУ, 2013. 121 с.

## REFERENCES

1 Gostev V.I. Nечetkie reguljatory v sistemah avtomaticheskogo upravlenija. Kiev: Radiomotor, 2008. 972 s. [in Russian].

2 Kevin M. Passino and Stephen Yurkovich, Fuzzy Control, Addison Wesley Longman, Menlo Park, CA, 1998. 522 s.

3 Metody robastnogo, nejro-nechjotkogo i adaptivnogo upravlenija: uchebnik / Pod red. N.D. Egupova; izd. 2-e, stereotip. M.:

izd-vo MGTU im. N.Э. Baumana, 2002. 744s. [in Russian].

4 Upravlenie proizvodstvom pri nechetkoj ishodnoj informacii / Aliev R.A. i dr. M.: Jenergoatomizdat, 1991. 240s. [in Russian].

5 Sultanov R.G., Solov'ev K.A. Algoritm sinteza adaptivnogo dinamicheskogo nechetkogo reguljatora // Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii: materialy / Vseros. nauch.-prakt. konf. (g. Ishimbaj, 17–18 maja 2013 g.). Ufa: UGATU, 2013. 121 s. [in Russian].

Соловьев К.А., ассистент кафедры «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВПО УГАТУ филиал, г. Ишимбай, Российская Федерация

*K.A. Soloviyov, Assistant of the Chair «Automation of production processes» FSBEI HPE USATU, branch, Ishimbay, the Russian Federation*  
vecarc@mail.ru

*Муравьева Е.А., д-р техн. наук, проф. кафедры «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВПО УГАТУ,*

*филиал, г. Ишимбай, Российская Федерация*

*E.A. Muraveva, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair «Automation of production processes» FSBEI HPE USATU, branch, Ishimbay, the Russian Federation*  
muraveva\_ea@mail.ru.

*Султанов Р. Г., канд. техн. наук, зав. кафедрой «Автоматизация производственных процессов», ФГБОУ ВПО УГАТУ, филиал, г. Ишимбай, Российская Федерация*

*R.G. Sultanov, Candidate of Engineering Sciences, Head of the Chair «Automation of production processes» FSBEI HPE USATU, branch, Ishimbay, the Russian Federation*