

**Д. Н. Анисимов**, канд. техн. наук, доц., AnisimovDN@mpei.ru, **Май Тхе Ань**, аспирант,  
Национальный исследовательский университет "МЭИ"

## Динамические свойства нечетких систем управления, построенных на основе реляционных моделей

*Анализируется влияние различных факторов на динамические характеристики нечеткого логического регулятора. Определены настройки регулятора, которые желательно устанавливать до начала эксплуатации системы, и настройки, которые можно изменять в процессе функционирования системы для достижения лучших показателей качества.*

**Ключевые слова:** нечеткий логический регулятор, динамические характеристики, функция принадлежности, реляционная модель, степень значимости, аппроксимирующая модель

### Введение

В современных системах управления широкое применение получили регуляторы, использующие алгоритмы нечеткого логического вывода (нечеткие логические регуляторы, НЛР). Как было отмечено в работе [1], "...проблемам нечеткого управления посвящено огромное количество книг, журналов, трудов конференций. Однако, с одной стороны, во многих книгах и журналах рассматриваются исключительно математические аспекты, и недостаточно внимания уделяется вопросам собственно нечеткого управления. С другой стороны, многие публикации посвящены простым практическим приложениям, и в них не отражаются теоретические основы нечетких систем управления". Следует заметить, что в последние годы, помимо решения многочисленных прикладных задач, появились серьезные работы, посвященные теоретическим вопросам исследования и разработки систем управления, основанных на использовании нечеткой логики, например, работы [2—4].

Исходной информацией при построении нечетких регуляторов служат знания экспертов. Эти знания формализуются с помощью построения функций принадлежности термов входных и выходных лингвистических переменных и установления нечеткого соответствия между пространством предпосылок и пространством заключений, т. е. построения базы правил. Однако трудно ожидать, что с первого раза будет достигнуто требуемое качество управления. Поэтому, как правило, необходим этап коррекции [5]. Основная проблема данного этапа состоит в сложности целенаправленного изменения базы знаний и параметров алгоритма нечеткого логического регулятора.

Поэтому представляется актуальной задача получения математической модели НЛР, пригодной для анализа системы с позиции классической теории автоматического управления.

### Постановка задачи

При построении систем, основанных на нечетких логических выводах, наибольшее распространение

получили алгоритмы Мамдани [6], Ларсена [7], Цукамото [8], Сугено—Такаги [9], а также реляционные модели [10, 11].

В данной статье для исследования выбран алгоритм на основе нечетких реляционных моделей. Этот алгоритм не является альтернативой перечисленным выше, он может использоваться совместно с ними и представляет собой модификацию механизма нечеткого логического вывода на этапе активизации правил. При использовании этого алгоритма устанавливается нечеткое соответствие между входными и выходными нечеткими переменными, задаваемое одним из трех эквивалентных способов: в теоретико-множественном виде, в матричном виде либо с помощью ориентированных графов [12]. При этом отпадает необходимость привязки к какой-либо из операций нечеткой импликации [13] и появляется возможность влиять на результат нечеткого вывода, изменяя не только функции принадлежности термов входных и выходных лингвистических переменных, но и элементы нечеткого соответствия. В реляционных моделях одной и той же входной ситуации может быть поставлено в соответствие несколько управляющих решений. Степень уверенности в том или ином решении задается с помощью графика нечеткого соответствия. Таким образом, нечеткое соответствие может не обладать свойством функциональности [11], т. е. формально может быть нарушен принцип непротиворечивости базы правил. Однако свойство нефункциональности характерно для многих систем нечеткого логического вывода [14, 15], и в реляционных моделях проблема несовместности правил разрешается достаточно легко путем применения операции композиции на этапе их активизации.

Анализ работы нечетких систем автоматического управления позволил выявить следующие основные факторы, влияющие на качество управления [16]:

- выбор входных и выходных переменных;
- число термов входных и выходных переменных;
- выбор того или иного логического базиса ( $T$ - и  $S$ -норм);

- диапазон изменения и вид функций принадлежности нечетких переменных, составляющих терм-множества лингвистических переменных;
- характер нечеткого соответствия между пространством предпосылок и пространством заключений (база правил);
- способ дефаззификации;
- степени значимости подусловий при их агрегировании.

Перечисленные факторы свидетельствуют о том, что число степеней свободы при построении нечеткой системы управления достаточно велико. С одной стороны, это свойство обеспечивает гибкость настройки НЛР. С другой стороны, большое число сочетаний перечисленных выше факторов затрудняет поиск рационального решения задачи настройки регулятора. Поэтому представляется достаточно важной оценка влияния каждого из этих факторов на динамику системы управления.

В данной работе исследования проводятся по двум направлениям:

- 1) определение зависимостей статических и частотных характеристик НЛР от его настроек;
- 2) анализ переходных процессов в нечеткой системе автоматического управления, построение аппроксимирующей линейной модели НЛР в виде ПД регулятора и определение зависимостей его параметров от настроек регулятора.

Первый подход основан на построении амплитудно-частотных и фазовых частотных характеристик НЛР по первой гармонике при его различных настройках.

Второй подход заключается в следующем. НЛР включается в замкнутый контур управления последовательно с объектом управления, параметры которого известны. На вход системы подается ступенчатый сигнал, и по наблюдениям выходного сигнала проводится идентификация НЛР методом экспоненциальной модуляции [17, 18]. Таким образом определяются коэффициенты пропорциональной ( $K_{\text{П}}$ ) и дифференциальной ( $K_{\text{Д}}$ ) составляющих аппроксимирующего линейного ПД регулятора. Подобный подход позволяет проводить качественное сопоставление между настройками НЛР и параметрами хорошо изученных традиционных линейных регуляторов.

### Лингвистические переменные для описания нечеткого логического регулятора и их терм-множества

В данном исследовании рассмотрим нечеткий регулятор, имеющий два входа, на которые подаются рассогласование системы и его производная, и один выход, представляющий собой сигнал управления, подаваемый на объект (рис. 1).

Здесь НЛР — нечеткий логический регулятор;  $W_o(s)$  — передаточная функция объекта;  $u$  и  $y$  — сигналы на входе и выходе системы соответственно;  $e$  — рассогласование;  $d$  — его производная;  $x$  —

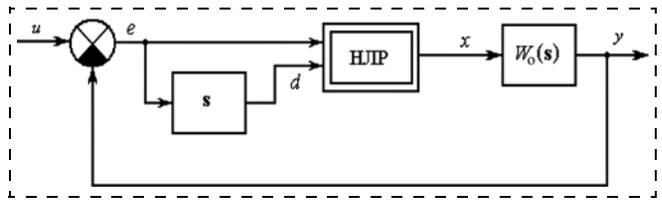


Рис. 1. Структурная схема нечеткой системы управления

сигнал на выходе регулятора. Объект представляет собой последовательное соединение интегрирующего и инерционного звеньев:

$$W_o(s) = \frac{K_o}{s(1 + sT_o)}, \quad (1)$$

где  $K_o = 10 \text{ с}^{-1}$ ,  $T_o = 1 \text{ с}$ , т. е. обладает достаточно простой структурой. Такой выбор обусловлен тем, что на данном этапе нас в первую очередь интересуют динамические свойства нечеткого регулятора, которые удобнее исследовать на примере хорошо изученных объектов. Введение интегрирующего звена в структуру объекта позволяет в случае возникновения статической ошибки в системе сделать вывод о том, что она обусловлена именно свойствами НЛР, а не объекта.

Мы ограничились рассмотрением пропорциональной и дифференциальной составляющих сигнала рассогласования по следующим соображениям.

- База знаний для НЛР составляется на основе экспертных оценок. Обычно для эксперта не составляет особой сложности высказать суждение о сигнале рассогласования и его первой производной, в то время как оценка его интеграла и высших производных может вызвать затруднения.
- В системах автоматического управления достаточно часто исполнительные механизмы содержат интегрирующие звенья, что обеспечивает астатизм этих систем.
- Введение интегрирующей составляющей в закон управления повышает порядок системы. Это может вызвать дополнительные проблемы, связанные с обеспечением устойчивости системы.
- Увеличение числа входных переменных влечет за собой экспоненциальный рост числа правил нечеткого вывода.

Изложенные аргументы, однако, не являются принципиальными, и описанные ниже подходы к исследованию могут быть распространены на регуляторы с другим набором входных сигналов.

Одним из важных этапов при формировании нечеткого логического вывода является выбор числа термов, описывающих лингвистические переменные. Если увеличение числа входных переменных, как было отмечено выше, обуславливает экспоненциальный рост числа правил нечеткого вывода, то увеличение числа термов лингвистических переменных — полиномиальный рост. Таким образом, возникает вопрос о числе термов, достаточ-

ном для обеспечения заданных показателей качества системы. В принципе, для достаточно простых объектов управления возможно построение регуляторов, лингвистические переменные которых описываются двумя [19] и даже одним термом [20]. Для односвязной модели увеличение числа симметричных функций принадлежности с равномерным распределением вдоль базовой оси приводит к увеличению линейного участка статической характеристики при условии последовательного сопоставления термам входной лингвистической переменной термов выходной лингвистической переменной [3]. При других схемах механизма нечеткого вывода можно получать статические характеристики произвольного вида, что позволяет говорить о нечетком регуляторе как об универсальном аппроксиматоре [21–23]. В данном исследовании будем описывать каждую лингвистическую переменную с помощью трех термов. Такой выбор обусловлен относительной простотой формализации знаний эксперта, а также удобством изменения характера нелинейного преобразования, осуществляемого нечетким регулятором.

Для описания НЛР введем лингвистические переменные <"Рассогласование" ("e"),  $T_E, E$ , <"Производная" ("d"),  $T_D, D$ , <"Управление" ("x"),  $T_X, X$ , где  $E = [-e_0; e_0]$ ,  $D = [-d_0; d_0]$ ,  $X = [-x_0; x_0]$  — их области определения,  $T_E = \{\tilde{T}_E^1, \tilde{T}_E^2, \tilde{T}_E^3\} = \{"N", "Z", "P"\}$ ,  $T_D = \{\tilde{T}_D^1, \tilde{T}_D^2, \tilde{T}_D^3\} = \{"N", "Z", "P"\}$ ,  $T_X = \{\tilde{T}_X^1, \tilde{T}_X^2, \tilde{T}_X^3\} = \{"N", "Z", "P"\}$  — их терм-множества. Здесь значения термов "N", "Z", "P" интерпретируются как "отрицательное", "около нуля", "положительное".

### Выбор логического базиса

Логический базис определяется выбором той или иной  $T$ -нормы и сопряженной с ней  $T$ -конормы ( $S$ -нормы), являющихся нечеткими расширениями операций "И" и "ИЛИ", такими что  $T, S: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ , для которых выполняются следующие аксиомы:

$T(x, 1) = x, T(x, 0) = 0; S(x, 1) = 1, S(x, 0) = x$  (граничные условия);

$T(x, y) = T(y, x); S(x, y) = S(y, x)$  (коммутативность);

$T(T(x, y), z) = T(x, T(y, z)); S(S(x, y), z) = S(x, S(y, z))$  (ассоциативность);

$T(x, y) \leq T(x, z)$ , если  $y \leq z$ ;  $S(x, y) \leq S(x, z)$ , если  $y \leq z$  (монотонность).

$T$ -норма и  $T$ -конорма в определенном смысле являются двойственными понятиями. Эти функции могут быть получены друг из друга, например, с помощью инволютивного отрицания  $n$  и законов Де Моргана следующим образом [24]:

$$S(x, y) = n(T(n(x), n(y)));$$

$$T(x, y) = n(S(n(x), n(y))).$$

Простейшие примеры  $T$ - и  $S$ -норм приведены в таблице.

Выбор того или иного базиса влияет на результат нечеткого логического вывода и, следовательно, потенциально может быть использован для настройки НЛР. В частности, эта проблема обсуждалась в работах [25, 26]. Принципиальная возможность коррекции систем за счет плавного изменения параметрически заданных треугольных норм была показана в работе [27]. В указанных работах были рассмотрены семейства  $T$ - и  $S$ -норм, задаваемых формулами Франка:

$$T_\lambda^F(x_1, x_2) = \log_\lambda \left[ 1 + \frac{(\lambda^{x_1} - 1)(\lambda^{x_2} - 1)}{\lambda - 1} \right];$$

$$S_\lambda^F(x_1, x_2) = 1 - \log_\lambda \left[ 1 + \frac{(\lambda^{(1-x_1)} - 1)(\lambda^{(1-x_2)} - 1)}{\lambda - 1} \right].$$

Выбор для исследования именно семейства  $T$ -норм Франка вполне обоснован, поскольку при  $\lambda \rightarrow 0$  логические операции удовлетворяют максимуму базису, при  $\lambda \rightarrow 1$  — алгебраическому, при  $\lambda \rightarrow \infty$  — ограниченному. Заметим, что в этих работах рассматривался достаточно узкий диапазон изменения параметра треугольных норм и показателей качества. Кроме того, исследовались лишь временные характеристики системы управления конкретным объектом. Для получения более полных суждений о влиянии треугольной нормы на динамику замкнутой системы предлагается исследовать не только переходные процессы в ней, но также статические и частотные характеристики са-

Примеры  $T$ - и  $S$ -норм

Логический базис	Нечеткое расширение "И" ( $T$ -норма)		Нечеткое расширение "ИЛИ" ( $S$ -норма)	
	Обозначение	Формула	Обозначение	Формула
Максиминный	$T_M, x_1 \wedge x_2$	$\min(x_1, x_2)$	$S_M, x_1 \vee x_2$	$\max(x_1, x_2)$
Алгебраический	$T_P, x_1 \bullet x_2$	$x_1 \cdot x_2$	$S_P, x_1 + x_2$	$x_1 + x_2 - x_1 x_2$
Ограниченный	$T_L, x_1 \otimes x_2$	$(x_1 + x_2 - 1) \vee 0$	$S_L, x_1 \otimes x_2$	$(x_1 + x_2) \wedge 1$
Сильный	$T_D, x_1 \Delta x_2$	$x_2$ , если $x_1 = 1$ $x_1$ , если $x_2 = 1$ 0 в других случаях	$S_D, x_1 \nabla x_2$	$x_2$ , если $x_1 = 0$ $x_1$ , если $x_2 = 0$ 1 в других случаях

мого нечеткого регулятора как элемента системы управления [28, 29]. В данной статье также рассмотрено семейство  $T$ - и  $S$ -норм Франка.

В качестве примера приведем расширенные статические характеристики (поверхности управления) НЛР для максиминного, алгебраического и ограниченного базисов и соответствующие им фазовые портреты в системе управления объектом, описываемым передаточной функцией (1) (рис. 2).

Как видно из рис. 2, изменение логического базиса действительно оказывает существенное влияние на динамические характеристики системы. Однако, как показали исследования, представленные в [28], непредсказуемость изменения характеристик нечеткой системы управления и их чувствительность по отношению к изменению вида нечеткого соответствия ставят под сомнение возможность целенаправленного воздействия на динамику нечеткой системы управления путем изменения треугольных норм, определяющих логический базис. Таким образом, в зависимости от специфики объекта управления и решаемой задачи целесообразно выбирать ту или иную треугольную норму на этапе проектирования системы и не изменять ее в процессе функционирования.

### Задание функций принадлежности

Известно достаточно много способов аналитического задания функций принадлежности (ФП), и их разные комбинации могут давать похожие результаты [1]. В данной работе выбран степенной способ задания функций принадлежности. При этом, изменяя один положительный параметр  $\gamma$  (степень), можно получить суждение о влиянии концентрирования или растяжения ФП либо в центре базовой шкалы, либо у ее краев. Степень  $\gamma$  — это степень, в которую возводятся функции принадлежности крайних термов. ФП среднего терма при этом автоматически возводятся в степень  $1/\gamma$ . Аналитическая форма задания ФП представлена следующими выражениями:

- "Отрицательное" —

$$\mu_{\bar{A}}(g) = \begin{cases} 1, & g < -G; \\ \left(-\frac{g}{G}\right)^{\gamma}, & -G \leq g \leq 0; \\ 0, & g > 0; \end{cases} \quad (2)$$

- "Около нуля" —

$$\mu_{\bar{A}}(g) = \begin{cases} 0, & g < -G; \\ \left(\frac{g}{G} + 1\right)^{1/\gamma}, & -G \leq g \leq 0; \\ \left(-\frac{g}{G} + 1\right)^{1/\gamma}, & 0 \leq g \leq G; \\ 0, & g > G; \end{cases} \quad (3)$$

- "Положительное" —

$$\mu_{\bar{A}}(g) = \begin{cases} 0, & g < 0; \\ \left(\frac{g}{G}\right)^{\gamma}, & 0 \leq g \leq G; \\ 1, & g > G, \end{cases} \quad (4)$$

где  $g = \{e, d, x\}$ ,  $G = \{E, D, X\}$ .

Изменение динамических свойств НЛР при изменении степени растяжения/сжатия  $\gamma$  ФП термов

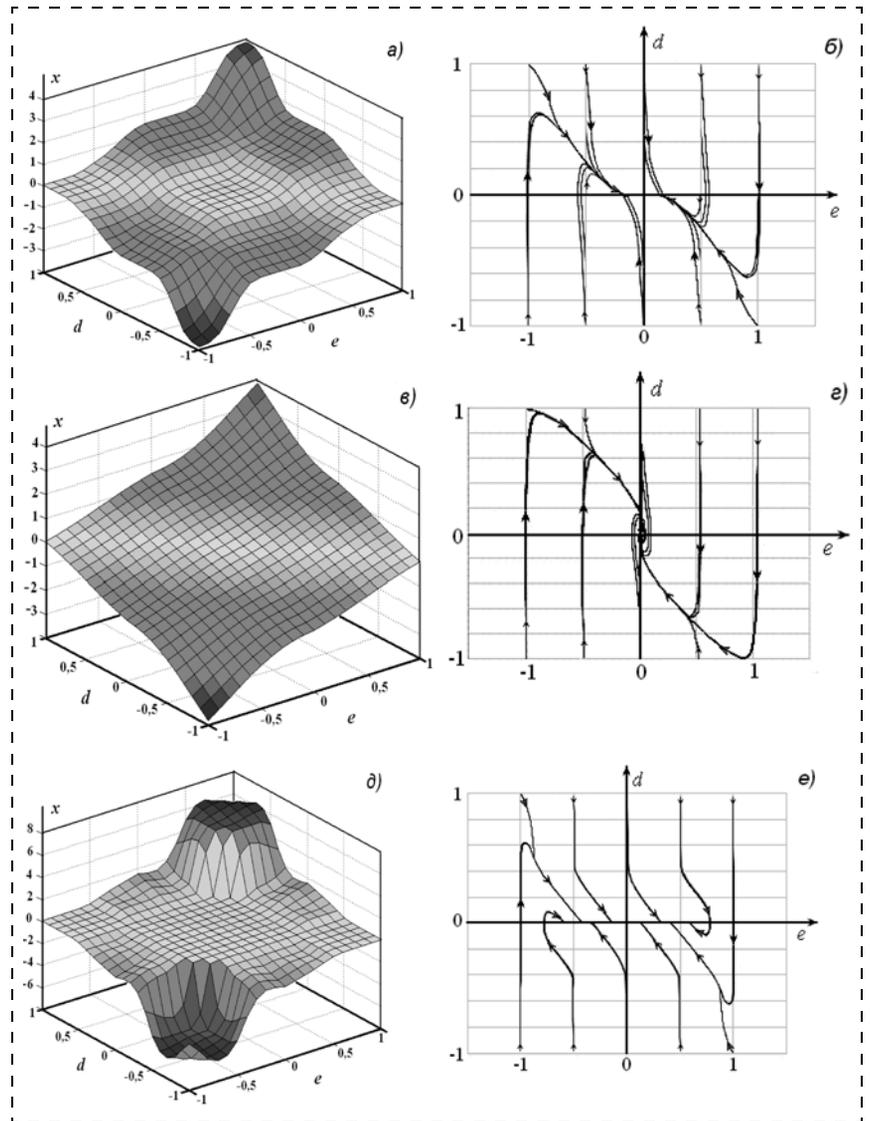


Рис. 2. Поверхности управления (а, в, д) и фазовые портреты (б, г, е) систем, основанных на максиминном, алгебраическом и ограниченном базисах соответственно

лингвистических переменных достаточно наглядно можно проиллюстрировать, рассматривая параметры аппроксимирующего линейного ПД регулятора [30], описываемого передаточной функцией

$$W_{ПД}(s) = K_{П} + K_{Д}s = K_{Ф}(1 + sT_{Ф}). \quad (5)$$

В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости параметров аппроксимирующего ПД регулятора при изменении формы ФП термов лингвистической переменной "Рассогласование", полученные при подаче на вход системы скачкообразных воздействий разной амплитуды  $U_m$ .

Анализ этих зависимостей показал, что на параметры аппроксимирующего ПД регулятора основное влияние оказывают соответствующие им входы (т. е. при изменении формы ФП термов лингвистической переменной "Рассогласование" параметр аппроксимирующего ПД регулятора  $K_{П}$  изменяется существенно сильнее, чем параметр  $K_{Д}$ ; при изменении ФП термов лингвистической переменной "Производная" — наоборот). Изменение формы ФП выходной переменной "Управление" влияет на общий коэффициент разомкнутой системы  $K_{Ф}$  и оказывает весьма незначительное влияние на постоянную времени форсирующего звена  $T_{Ф}$ . При этом характер зависимостей практически не зависит от амплитуды входного сигнала. Монотонный характер зависимостей делает удобным использование параметра  $\gamma$  для настройки НЛР. Следует, однако, учесть, что при достаточно больших значениях этого параметра и максимумном логическом базисе на поверхности управления появляется зона

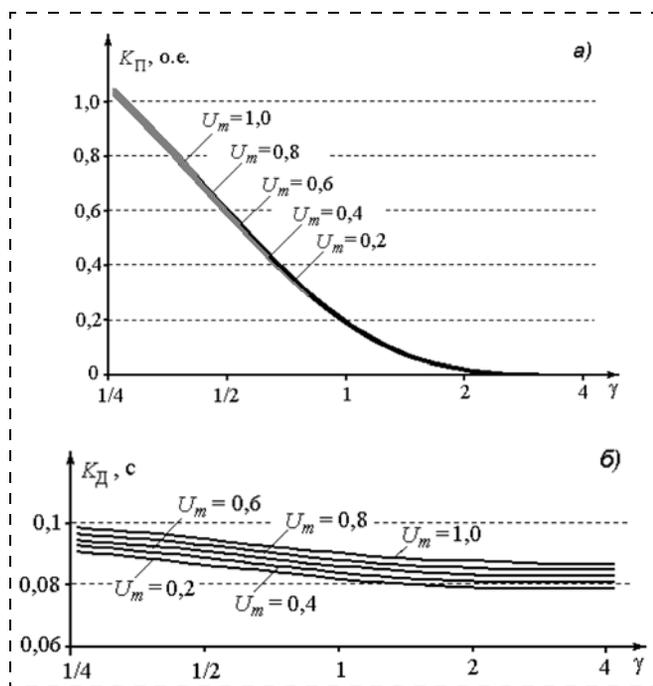


Рис. 3. Зависимости параметров аппроксимирующего ПД-регулятора при изменении формы функций принадлежности термов лингвистической переменной "Рассогласование" (е): а —  $K_{П}$ , б —  $K_{Д}$

нечувствительности, что приводит к появлению статической ошибки в системе.

Другим важным параметром ФП, заданных в форме (2)—(4), является область определения (задаваемый диапазон изменения)  $G$  той или иной лингвистической переменной. По сути, размер этой области определяет наклон ФП. Чем уже эта область, тем круче наклон. Увеличение наклона ФП термов какой-либо входной лингвистической переменной, в свою очередь, увеличивает ее вклад в результат нечеткого вывода. При уменьшении диапазона изменения выходной лингвистической переменной наблюдается обратная зависимость — снижается общий коэффициент усиления НЛР. Параметр  $G$  также вполне пригоден для настройки НЛР. Недостатком его использования является то, что при малой области определения входной лингвистической переменной быстрее достигается насыщение соответствующих ФП, что затрудняет управление системой. Однако, как показали исследования, этот эффект оказывает меньшее влияние на достижение системой заданных показателей качества, чем появление зоны нечувствительности.

### Нечеткое соответствие между пространством предпосылок и пространством заключений

Как было отмечено выше, при построении нечетких систем, основанных на реляционных моделях, при построении базы правил используются нечеткие соответствия между пространством предпосылок и пространством заключений, которые строятся на основании знаний экспертов. Их удобно задавать с помощью реляционных матриц, элементами которых являются степени уверенности эксперта в том или ином управляющем решении при наблюдении различных входных ситуаций [31]. Для рассматриваемого случая размер реляционной матрицы составляет  $9 \times 3$ , т. е. на результат логического вывода можно влиять, изменяя значения 27 элементов от 0 до 1. Очевидно, для практических задач такое число управляющих решений является чрезмерно большим. Поэтому в работе [29] было предложено ограничиться рассмотрением трех нечетких соответствий, представляющих собой характерные модели принятия решений и задаваемых реляционными матрицами  $R_1, R_2, R_3$ :

$$R_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} N & Z & P \end{matrix} \\ \begin{matrix} NN \\ NZ \\ NP \\ ZN \\ ZZ \\ ZP \\ PN \\ PZ \\ PP \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}; \quad R_2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} N & Z & P \end{matrix} \\ \begin{matrix} NN \\ NZ \\ NP \\ ZN \\ ZZ \\ ZP \\ PN \\ PZ \\ PP \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,8 & 0,2 & 0 \\ 0,5 & 0,5 & 0 \\ 0,4 & 0,6 & 0,4 \\ 0,5 & 0,5 & 0 \\ 0,3 & 0,7 & 0,3 \\ 0 & 0,5 & 0,5 \\ 0,4 & 0,6 & 0,4 \\ 0 & 0,5 & 0,5 \\ 0 & 0,2 & 0,8 \end{bmatrix} \end{matrix};$$

$$R_3 = \begin{matrix} & N & Z & P \\ \begin{matrix} NN \\ NZ \\ NP \\ ZN \\ ZZ \\ ZP \\ PN \\ PZ \\ PP \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,8 & 0,3 & 0 \\ 0,2 & 0,7 & 0,2 \\ 0,7 & 0,4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0,4 & 0,7 \\ 0,2 & 0,7 & 0,2 \\ 0 & 0,3 & 0,8 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

**Пример.** Пусть нечеткое соответствие задается матрицей  $R_3$ . Тогда третья строка этой матрицы задает следующее правило:

**ПЗ:** ЕСЛИ "Рассогласование" = "Отрицательно" И "Производная" = "Положительна", то "Управление" = "Отрицательно" (со степенью уверенности 0,2), "Около нуля" (со степенью уверенности 0,7), "Положительно" (со степенью уверенности 0,2).

Первое соответствие можно содержательно интерпретировать как "решительную" модель действий, когда лицо, принимающее решение, абсолютно уверенно выбирает одно из возможных управляющих воздействий даже при самых незначительных предпочтениях. Второе соответствие будем называть "неуверенной" моделью действий. Для этого случая характерна очень большая осторожность в принимаемых решениях, однако не выходящая за пределы здравого смысла. Третье соответствие будем называть "взвешенной" моделью, когда при очевидных предпочтениях уверенно выбираются управляющие воздействия, при неочевидных — выбор осуществляется более осторожно.

Различия между этими тремя нечеткими соответствиями отчетливо видны на статических харак-

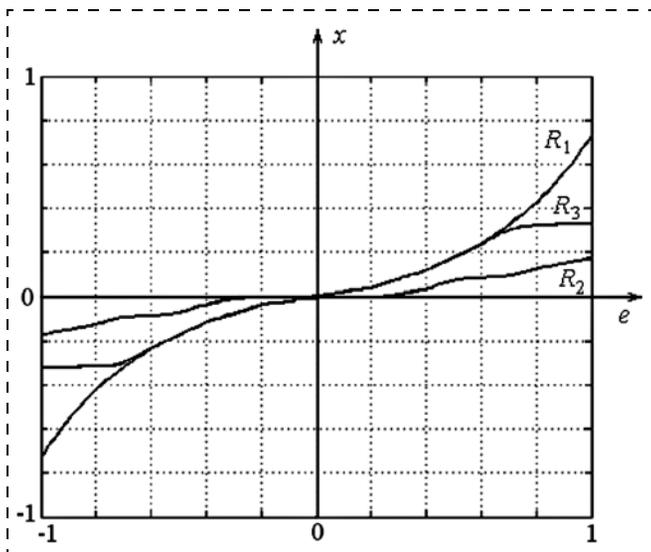


Рис. 4. Статические характеристики нечеткого регулятора для "решительной" ( $R_1$ ), "неуверенной" ( $R_2$ ) и "взвешенной" ( $R_3$ ) моделях нечеткого соответствия

теристиках НЛР (рис. 4), полученных при отключении его дифференциального входа.

Как видно из рис. 4, статическая характеристика НЛР для "решительной" модели нечеткого соответствия вполне предсказуемо обладает наибольшей крутизной, для "неуверенной" — наименьшей. Более того, при "неуверенной" модели появляется достаточно широкая зона нечувствительности, что ставит под сомнение целесообразность ее использования при построении системы управления.

### Дефаззификация

Дефаззификация в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру нахождения обычного (не нечеткого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных. Применяемые в современных системах управления устройства и механизмы способны воспринимать традиционные команды в форме количественных значений соответствующих управляющих переменных. Именно по этой причине необходимо преобразовать нечеткие множества в некоторые конкретные значения переменных. Поэтому дефаззификацию называют также приведением к четкости.

Для выполнения численных расчетов на этапе дефаззификации могут быть использованы различные формулы, получившие название методов дефаззификации. Приведем выражения для некоторых из них.

#### • Метод центра тяжести

Центр тяжести или центроид площади рассчитывается по формуле

$$x^* = \frac{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x \mu'(x) dx}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \mu'(x) dx}, \quad (7)$$

где  $\mu'(x)$  — ФП выходной лингвистической переменной, полученная на этапе аккумуляции.

В дискретном виде формула центроида имеет вид

$$x^* = \frac{\sum_{j=1}^N x \mu'(x) dx}{\sum_{j=1}^N \mu'(x) dx}, \quad (8)$$

где  $N$  — число рассматриваемых точек ФП данной лингвистической переменной.

#### • Метод центра площади

Центр площади  $x^*$  определяется из уравнения

$$\int_{x_{\min}}^{x^*} \mu'(x) dx = \int_{x^*}^{x_{\max}} \mu'(x) dx. \quad (9)$$

Таким образом, центр площади равен абсциссе, которая делит площадь, ограниченную графиком кривой ФП соответствующей выходной переменной, на две равные части.

• *Методы левого и правого модальных значений*

Левое и правое модальные значения определяются в соответствии с выражениями

$$x^* = \min\{x_{\text{mod}}\}; \quad (10)$$

$$x^* = \max\{x_{\text{mod}}\}, \quad (11)$$

где  $x_{\text{mod}}$  — модальное значение (мода) нечеткого множества, соответствующего выходной переменной  $x$  после аккумуляции:

$$x_{\text{mod}} = \arg \max_{x \in [x_{\text{min}}, x_{\text{max}}]} \{\mu'(x)\}. \quad (12)$$

Наибольшее распространение в настоящее время получил метод центра тяжести, поскольку он позволяет более полно учитывать влияние ФП всех термов выходной лингвистической переменной и обеспечивает непрерывность статической характеристики НЛР. Кроме того, за исключением некоторых частных случаев, метод центр тяжести обеспечивает также монотонность статической характеристики НЛР. Такими частными случаями являются:

- изменение естественного порядка взаимосвязей одноименных термов входных и выходных переменных [32];
- использование некоторых логических базисов (например, ограниченного).

В качестве основных недостатков метода центра тяжести указывают [2], во-первых, высокую стоимость вычислений, связанную с интегрированием поверхностей нерегулярной формы, особенно в случае использования ФП, не состоящих из прямолинейных участков (например, гауссовых функций); во-вторых, сужение интервала дефазификации. Заметим, однако, что в подавляющем большинстве случаев НЛР реализуются на цифровой технике, и для вычисления центроида используется формула (8), для которой не имеет значения форма интегрируемой поверхности. Что касается второго недостатка, то он также легко устраняется путем расширения области определения выходных лингвистических переменных.

**Степени значимости подусловий**

Степени значимости подусловий учитываются на этапе агрегирования и являются одним из факторов, влияющих на результат нечеткого логического вывода. Агрегирование представляет собой процедуру вычисления степени выполнения сложных условий, являющихся комбинацией простых. При этом если подусловия соединены связкой "ИЛИ", то эта степень обычно вычисляется при помощи операции  $\mathcal{S}$ -нормы:

$$\mu_{\tilde{B}}(c) = \mathbf{S}_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}_i}(e_i), \quad (13)$$

где  $e_i$  — входные лингвистические переменные;  $\tilde{A}_i$  — их нечеткие значения;  $c$  — агрегированная лингвистическая переменная;  $\tilde{B}$  — ее нечеткое значение;  $\mu_{\tilde{A}_i}(e_i)$  — степени истинности подусловий,  $\mu_{\tilde{B}}(c)$  — степень истинности предпосылки;  $\mathbf{S}$  — заданная операция  $\mathcal{S}$ -нормы;  $n$  — число подусловий в данном правиле;

если подусловия соединены связкой "И", то с помощью операции  $T$ -нормы:

$$\mu_{\tilde{B}}(c) = \mathbf{T}_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}_i}(e_i), \quad (14)$$

где  $\mathbf{T}$  — заданная операция  $T$ -нормы.

Целесообразность введения в рассмотрение степеней значимости обусловлена тем, что в процессе принятия решений человек оценивает не только истинность какого-либо подусловия, но и его важность [31, 33]. Обозначим  $F_i$  — степень значимости  $i$ -го подусловия ( $F_i \in [0; 1]$ ). Тогда при использовании логической связки "ИЛИ" выражение для вычисления степени выполнения сложного условия примет вид

$$\mu_{\tilde{B}}(c) = \mathbf{S}_{i=1}^n [F_i \mathbf{T} \mu_{\tilde{A}_i}(e_i)], \quad (15)$$

при использовании связки "И":

$$\mu_{\tilde{B}}(c) = \mathbf{T}_{i=1}^n [1 - F_i \mathbf{T} (1 - F_i \mathbf{T} (1 - \mu_{\tilde{A}_i}(e_i)))] \quad (16)$$

Нечеткий регулятор, рассматриваемый в данном исследовании, имеет два входа, т. е. каждое из правил логического вывода содержит два подусловия, соединенных связкой "И". Обозначим степени их значимости  $F_e$  и  $F_d$ . При выборе алгебраического базиса ( $a \mathbf{T} b = ab$ )

$$\mu_{\tilde{B}}(c) = [1 - F_e(1 - \mu_{T_E}(e_i))][1 - F_d(1 - \mu_{T_D}(d))]. \quad (17)$$

Для исследования влияния степеней значимости на динамику системы оценивались параметры аппроксимирующего линейного ПД регулятора, описываемого передаточной функцией (5). На рис. 5 приведены зависимости параметров аппроксимирующего ПД регулятора при изменении степени значимости  $F_{\Pi}$  подусловия, соответствующего лингвистической переменной "Рассогласование".

Анализ этих зависимостей показывает, что увеличение степени значимости того или иного входа НЛР приводит к увеличению одноименного параметра аппроксимирующего ПД регулятора и слабо влияет на другой параметр. Это свидетельствует о возможности воздействия на динамические характеристики НЛР путем изменения степеней значимо-

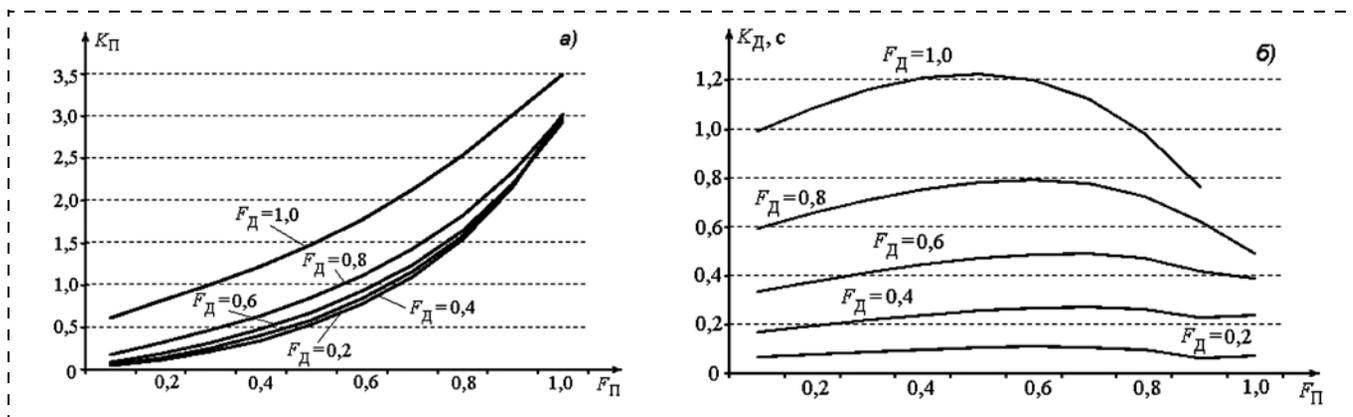


Рис. 5. Зависимости параметров аппроксимирующего ПД регулятора при изменении степени значимости  $F_D$  подусловия, соответствующего лингвистической переменной "Рассогласование" (e): а —  $K_P$ , б —  $K_D$

сти подусловий, определяющих нечеткие значения каждой из входных лингвистических переменных. Заметим, однако, что вследствие ограниченного диапазона изменения степеней значимости (от 0 до 1) они не в состоянии обеспечить настройку НЛР в широких пределах, но вполне пригодны для тонкой подстройки регулятора.

### Заключение

В статье приведены результаты анализа влияния параметров настроек нечеткого логического регулятора на его динамические характеристики, которые позволяют сделать следующие выводы.

1. Выбор входных и выходных переменных, а также числа их термов следует осуществлять исходя из структуры системы управления и требований к ее качеству, избегая их необоснованного увеличения.

2. Логический базис следует выбирать на этапе проектирования системы и не изменять в процессе ее функционирования. При этом алгебраический базис обеспечивает наименьшие нелинейные искажения характеристик НЛР, что делает его поведение достаточно предсказуемым. Вместе с тем, поверхность управления НЛР при использовании максиминного базиса имеет ощутимое уменьшение наклона вблизи начала координат, что усиливает стабилизирующие свойства регулятора.

3. Диапазон изменения и степень растяжения-сжатия ФП нечетких переменных, составляющих терм-множества лингвистических переменных, позволяют плавно изменять характер процессов в системе управления в широких пределах и могут быть использованы для автоматической подстройки регулятора в режиме нормальной эксплуатации.

4. Нечеткое соответствие между пространством предпосылок и пространством заключений (базу правил) желательно настроить в тестовом режиме до начала эксплуатации системы и в дальнейшем его не изменять.

5. Дефаззификацию целесообразно осуществлять методом центра тяжести.

6. Степени значимости подусловий могут быть использованы для автоматической подстройки регулятора в тех случаях, когда параметры объекта управления в процессе функционирования изменяются не более чем на один порядок.

### Список литературы

1. Jager R. Fuzzy logic in control. I11. Thesis Technische Universiteit Delft, 1995.
2. Пергат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.
3. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Ситников М. С. Исследование периодических колебаний в системах управления с нечеткими регуляторами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 6. С. 37—45.
4. Усков А. А., Киселев Е. В. Теория нечетких супервизорных систем управления. Смоленск: Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ "Российский университет кооперации", 2013.
5. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993.
6. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with fuzzy logic controller // Int. J. Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7, N. 1. P. 1—13.
7. Larsen P. M. Industrial applications of fuzzy logic control // Int. J. Man-Machine Studies. 1980. Vol. 12, N. 1. P. 3—10.
8. Tsukamoto Y. An approach to fuzzy reasoning method // An approach to fuzzy reasoning method. In: M. M. Gupta, Ragade R. K. and Yager R. R. (Eds.) Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications. North-Holland, Amsterdam, 1979. P. 137—149.
9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. 1985. Vol. 15, N. 1. P. 116—132.
10. Pedrycz W. Fuzzy Control and Fuzzy Systems. New York: John Wiley and Sons, 1993.
11. Анисимов Д. Н., Пискунова Ю. Ю. Использование нефункциональных соответствий при построении нечетких систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 3. С. 18—21.
12. Анисимов Д. Н. Нечеткие алгоритмы управления: учеб. пособ. М.: Издательство МЭИ, 2004.
13. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия—Телеком, 2012.
14. Piegat A., Plucifski M. Application of the radial basis-function in modeling and identification of nonlinear systems // Proc.

of the XII Int. Conf. on Systems Science, vol. 1. Wrocław, Poland, 1995. P. 266—274.

15. **González A., Pérez R.** Completeness and consistency conditions for learning fuzzy rules // *Fuzzy Sets and Systems*. 1998. N. 96 (7). P. 37—52.

16. **Анисимов Д. Н.** Использование нечеткой логики в системах автоматического управления // *Приборы и системы*. 2001. № 8. С. 39—42.

17. **Анисимов Д. Н.** Идентификация линейных динамических объектов методом экспоненциальной модуляции // *Вестник МЭИ*. 1994. № 2. С. 68—72.

18. **Анисимов Д. Н., Хрипков А. В.** Законы распределения оценок параметров динамических объектов при идентификации методом экспоненциальной модуляции // *Проблемы управления*. 2007. № 4. С. 18—21.

19. **Гостев В. И.** Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011.

20. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006.

21. **Kosko B.** Fuzzy Systems as Universal Approximators // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, 1992. P. 1153—1162.

22. **Wang L. X.** Fuzzy Systems Are Universal Approximators // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, 1992. P. 1153—1162.

23. **Castro J. L.** Fuzzy Logic Controllers Are Universal Approximators // *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*. 1995. Vol. 25, N. 4. P. 629—635.

24. **Батыршин И. З.** Основные операции нечеткой логики и их обобщения. Казань: Отечество, 2001.

25. **Cervinka O.** Automatic tuning of parametric  $T$ -norms and  $T$ -conorms in fuzzy modeling // *Proc. 7th IFSA World Congress*. Prague: ACADEMIA, 1997. Vol. 1. P. 416—421.

26. **Batyrsin I., Kaynak O., Rudas I.** Fuzzy modeling based on generalized conjunction operations // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, October 2002. Vol. 10, N. 5. P. 678—683.

27. **Аверкин А. Н., Сулин К. В.** Построение нечеткого регулятора скорости электродвигателя на базе параметрических логик // *Материалы Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям*. Санкт-Петербург, 1999. С. 226—228.

28. **Анисимов Д. Н., Новиков В. Н., Сафина Э. А., Ситников К. Ю.** Исследование влияния выбора логического базиса на характеристики нечеткого регулятора // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 8 (149). С. 12—17.

29. **Анисимов Д. Н., Новиков В. Н., Сафина Э. А.** Исследование влияния треугольных норм на динамику нечеткой системы автоматического управления // *Вестник МЭИ*. 2013. № 4. С. 186—192.

30. **Анисимов Д. Н., Дроздова Е. Д., Новиков В. Н.** Исследование свойств нечеткого аппроксимирующего ПД регулятора // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 9. С. 6—12.

31. **Анисимов Д. Н., Ситников К. Ю.** Методика построения нечетких реляционных систем автоматического управления // *Вестник МЭИ*. 2012. № 3. С. 77—82.

32. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Ситников М. С.** Устойчивость интеллектуальных систем автоматического управления // *Информационные технологии*. 2013. № 2. С. 1—23.

33. **Анисимов Д. Н., Дроздова Е. Д., Новиков В. Н.** Исследование влияния степеней значимости подусловий на динамические характеристики нечеткого логического регулятора // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2015. Т. 16. № 6. С. 363—368.

## Dynamic Properties of the Fuzzy Control Systems Based on the Relational Models

**D. N. Anisimov**, AnisimovDN@mpei.ru✉, **Mai Tkhe Anh**,

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russian Federation

*Corresponding author: Anisimov Dmitrii N., Ph. D., Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: AnisimovDN@mpei.ru*

*Received on October 03, 2016  
Accepted on November 11, 2016*

*The paper is devoted to the analysis of the influence of various factors on the dynamic characteristics of the fuzzy logic controller (FLC). In particular, the following factors are considered: the choice of the input and output variables; the number of terms, the turn-down and the form of the membership functions of the fuzzy variables, the character of the relation between the space of the antecedents and the space of the consequents (the rule base), the mode of defuzzification and the measures of the sub-conditions significance. A research was carried out in two directions. The first direction consisted in determination of the dependence of FLC static and frequency characteristics on its settings. The second one was an analysis of the frequency characteristics in the fuzzy control systems, the construction of FLC linear model in a form of PD controller and determination of the dependence of its parameters on FLC settings. The conducted research allows us to draw the following conclusions. 1. Selection of the input and output variables and the number of terms should be based on the structure of the control system and on the requirements to its quality, avoiding their unreasonable increase. 2. The logical basis should be chosen at the stage of the system design and should not be changed in the process of its functioning. Thus, the algebraic basis ensures the least nonlinear distortion of FLC characteristics, making its behavior quite predictable. On the other hand, the control surface of FLC, when using the maxmin basis, has a small slope near the origin of the coordinates, which enhances the stabilizing properties of the controller. 3. The turn-down and dilatation-concentration degree of the membership functions of the fuzzy variables make it possible to change the system's behavior smoothly in a wide range and can be used for an automatic tuning of FLC during a normal operation. 4. The fuzzy relation between the space of the antecedents and the space of the consequents (the rule base) should be tuned in a test mode before the system operation and should not be changed hereafter. 5. It is advisable to carry out a procedure of defuzzification by the method of the center of gravity. 6. Measures of the sub-condition significance can be used for an automatic tuning of FLC in cases, when the parameters of the control object in the process of operation do not change by more than one order.*

**Keywords:** fuzzy logic inference; dynamic characteristics; membership function; relational model; aggregation of the sub-conditions; truth degrees; measure of significance; fuzzy controller; approximating model; PD-controller

For citation:

**Anisimov D. N., Mai Tkhe Anh.** Dynamic Properties of the Fuzzy Control Systems Based on the Relational Models, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 298—307.

DOI: 10.17587/mau.18.298-307

## References

1. **Jager R.** Fuzzy logic in control. I11, Thesis Technische Universiteit Delft, 1995.
2. **Piegat A.** *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy modeling and control), Moscow, Binom. Laboratorija znaniy, 2009 (in Russian).
3. **Makarov I. M., Lohin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Sitnikov M. S.** *Issledovanie periodicheskikh kolebanij v sistemah upravlenija s nechetkimi reguljatorami* (Research of periodic fluctuations in control systems with fuzzy regulators), *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy*, 2013, vol. 11, no. 6, pp. 37—45 (in Russian).
4. **Uskov A. A., Kiselev E. V.** *Teorija nechetkih supervizornyh sistem upravlenija* (The theory of fuzzy supervisor control systems), Smolensk, Smolenskij filial ANO VPO CS RF "Rossijskij universitet kooperacii", 2013 (in Russian).
5. **Asai K., Vatada D., Ivai S.** et al. *Prikladnye nechetkie sistemy* (Applied fuzzy systems), T. Tjerano, K. Asai, M. Sugeno (Eds.), Moscow, Mir, 1993 (in Russian).
6. **Mamdani E. H., Assilian S.** An experiment in linguistic synthesis with fuzzy logic controller, *Int. J. Man-Machine Studies*, 1975, vol. 7, no. 1, pp. 1—13.
7. **Larsen P. M.** Industrial applications of fuzzy logic control, *Int. J. Man-Machine Studies*, 1980, vol. 12, no. 1, pp. 3—10.
8. **Tsukamoto Y.** An approach to fuzzy reasoning method, In: M. M. Gupta, Ragade R. K. and Yager R. R. (Eds.) *Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications*, North-Holland, Amsterdam, 1979, pp. 137—149.
9. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 1985, vol. 15, no. 1, pp. 116—132.
10. **Pedrycz W.** *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, New York, John Wiley and Sons, 1993.
11. **Anisimov D. N., Piskunova Ju. Ju.** *Ispol'zovanie nefunkcional'nyh sootvetstvij pri postroenii nechetkih sistem upravlenija* (Use of Nonfunctional Agreements in Structure of Fuzzy Control Systems), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2007, no 3, pp. 18—21.
12. **Anisimov D. N.** *Nechetkie algoritmy upravlenija* (Fuzzy algorithms of control), Moscow, Publishing house of MJeI, 2004 (in Russian).
13. **Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S.** *Nechetkie modeli i seti* (Fuzzy models and networks), Moscow, Gorjachaja linija—Telekom, 2012 (in Russian).
14. **Piegat A., Plucifski M.** Application of the radial basis-function in modeling and identification of nonlinear systems, *Proc. of the XII Int. Conf. on Systems Science*, vol. 1, Wroclaw, Poland, 1995, pp. 266—274.
15. **González A., Pérez R.** Completeness and consistency conditions for learning fuzzy rules, *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, no. 96 (7), pp. 37—52.
16. **Anisimov D. N.** *Ispol'zovanie nechetkoj logiki v sistemah avtomaticheskogo upravlenija* (The use of fuzzy logic in automatic control systems), *Pribory i Sistemy*, — 2001, no. 8, pp. 39—42 (in Russian).
17. **Anisimov D. N.** *Identifikacija linejnyh dinamičeskikh objektov metodom jeksponencial'noj moduljacii* (Identification of linear dynamic objects), *Vestnik MJeI*, 1994, no 2, pp. 68—72 (in Russian).

18. **Anisimov D. N., Hripkov A. V.** *Zakony raspredelenija ocenok parametrov dinamičeskikh objektov pri identifikacii metodom jeksponencial'noj moduljacii* (Distribution laws of dynamic objects' parameter estimates in the identification by exponential modulation method), *Problemy Upravlenija*, 2007, no. 4, pp. 18—21 (in Russian).

19. **Gostev V. I.** *Proektirovanie nechetkih reguljatorov dlja sistem avtomaticheskogo upravlenija* (Design of fuzzy controllers for automatic control systems), SPb., BHV-Peterburg, 2011 (in Russian).

20. **Makarov I. M., Lohin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P.** *Iskusstvennyj intellekt i intellektual'nye sistemy upravlenija* (Artificial intelligence and intelligent control systems), Moscow, Nauka, 2006 (in Russian).

21. **Kosko B.** Fuzzy Systems as Universal Approximators, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, 1992, pp. 1153—1162.

22. **Wang L. X.** Fuzzy Systems Are Universal Approximators, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, 1992, pp. 1153—1162.

23. **Castro J. L.** Fuzzy Logic Controllers Are Universal Approximators, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 1995, vol. 25, no. 4, pp. 629—635.

24. **Batyrshin I. Z.** *Osnovnye operacii nechetkoj logiki i ih obobshhenija* (Basic operations of fuzzy logic and their generalizations), Kazan', Otechestvo, 2001 (in Russian).

25. **Cervinka O.** Automatic tuning of parametric  $T$ -norms and  $T$ -conorms in fuzzy modeling, *Proc. 7th IFSA World Congress*, Prague, ACADEMIA, 1997, vol. 1, pp. 416—421.

26. **Batyrshin I., Kaynak O., Rudas I.** Fuzzy modeling based on generalized conjunction operations, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, October 2002, vol. 10, no. 5, pp. 678—683.

27. **Averkin A. N., Sulin K. V.** *Postroenie nechetkogo reguljatora skorosti jelektromotora na baze parametricheskikh logik* (Building a fuzzy speed regulator of the electric motor based on parametric logic), *Materialy Mezhdunar. konf. po mjagkim vychislenijam i izmerenijam*, Sankt-Peterburg, 1999, pp. 226—228 (in Russian).

28. **Anisimov D. N., Novikov V. N., Safina Je. A., Sitnikov K. Ju.** *Issledovanie vlijanija vybora logičeskogo bazisa na harakteristiki nechetkogo reguljatora* (Research of Logical Basis Choice Influence on Fuzzy Regulator Characteristics), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no. 8 (149), pp. 12—17 (in Russian).

29. **Anisimov D. N., Novikov V. N., Safina Je. A.** *Issledovanie vlijanija treugol'nyh norm na dinamiku nechetkoj sistemy avtomaticheskogo upravlenija* (Research of triangular norms influence on dynamics of the fuzzy logic automatic control system), *Vestnik MJeI*, 2013, no 4, pp. 186—192 (in Russian).

30. **Anisimov D. N., Drozdova E. D., Novikov V. N.** *Issledovanie svojstv nechetkogo approksimirujushhego PD reguljatora* (The study of the properties of the approximating fuzzy PD controller), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2014, no. 9, pp. 6—12 (in Russian).

31. **Anisimov D. N., Sitnikov K. Ju.** *Metodika postroenija nechetkih reljacionnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija* (The construction method for fuzzy relational automatic control systems), *Vestnik MJeI*, 2012, no 3, pp. 77—82 (in Russian).

32. **Makarov I. M., Lohin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Sitnikov M. S.** *Ustojčivost' intellektual'nyh sistem avtomaticheskogo upravlenija* (Stability of intelligent systems of automatic control), *Informacionnye Tehnologii*, 2013, no. 2, pp. 1—23 (in Russian).

33. **Anisimov D. N., Drozdova E. D., Novikov V. N.** *Issledovanie vlijanija stepenej znachimosti poduslovij na dinamicheskie harakteristiki nechetkogo logičeskogo reguljatora* (Research of the Influence of the Sub-Conditions Measure of Significance on the Dynamic Characteristics of a Fuzzy Logic Controller), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 363—368 (in Russian).