

УДК 681.511.46

Д. Н. Анисимов, канд. техн. наук, доц., AnisimovDN@mpei.ru,

Е. Д. Дроздова, студент, В. Н. Новиков, аспирант,

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва

Исследование влияния степеней значимости подусловий на динамические характеристики нечеткого логического регулятора¹

Предложена модификация правил нечеткого логического вывода для случаев, когда подусловия имеют различную значимость. Показано, что учет степеней значимости подусловий позволяет более адекватно отражать реальность в задачах принятия решений, в том числе целенаправленно воздействовать на динамику нечеткой системы управления.

Ключевые слова: нечеткий логический вывод, агрегирование подусловий, степень истинности, степень значимости, нечеткий регулятор, аппроксимирующая модель, ПД регулятор

Введение

Анализ работы нечетких систем автоматического управления позволил выявить следующие основные факторы, влияющие на качество управления [1]:

- число термов входных и выходных переменных;
- вид функций принадлежности нечетких переменных, составляющих терм-множества лингвистических переменных;
- характер нечеткого соответствия между пространством предпосылок и пространством заключений;
- способ дефазификации;
- выбор логического базиса, т. е. тех или иных Т-норм и S-норм [2, 3].

Варьируя эти факторы, мы, по существу, изменяем параметры настройки нечеткого регулятора для достижения наилучших показателей качества системы. В тех случаях, когда мы имеем дело с динамическим объектом, нас помимо сигнала рассогласования, как правило, интересует, по меньшей мере, его первая производная. В традиционных системах автоматического управления имеется возможность изменять параметры регуляторов (ПИД, ПД и др.) по отдельности [4]. В нечетких же регуляторах эта возможность ограничивается спецификой агрегирования подусловий, поскольку в большинстве известных алгоритмов при агрегировании используется Т-норма (как правило, \min -конъюнкция). В данном исследовании предлагается процедура определения значения истинности условия, учитывающая различную значимость отдельных подусловий [5], в том числе применительно к задаче управления динамическим объектом.

¹ Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-01-00082-а).

При построении систем, основанных на нечетких логических выводах, наибольшее распространение получили алгоритмы Мамдани [6], Ларсена [7], Цукamoto [8], Сугено — Такаги [9], а также реляционные модели [10]. При реализации этих алгоритмов необходимо выполнение следующих основных этапов [11, 12]:

- формирование базы правил систем нечеткого вывода;
- фаззификация (введение нечеткости);
- агрегирование степеней истинности предпосылок правил;
- активизация заключений правил;
- аккумуляция заключений;
- дефаззификация (приведение к четкости).

В статье рассматривается модификация процедуры агрегирования степени истинности предпосылок правил, которая учитывает степени значимости подусловий в правилах нечеткого логического вывода, и оценивается их влияние на динамические свойства нечеткого логического регулятора (НЛР).

Агрегирование подусловий с учетом степеней их значимости

Как можно заметить, число факторов, влияющих на результат нечеткого логического вывода, достаточно велико, что затрудняет целенаправленный поиск решения, обеспечивающего заданные показатели качества системы. Тем не менее, в работе [5] было предложено ввести в рассмотрение еще один фактор, а именно степени значимости подусловий в правилах логического вывода. Это было продиктовано следующими соображениями.

1. В процессе принятия решений человек оценивает не только степень истинности какого-либо

подусловия, но и степень его значимости. Приведем простой пример.

Преподаватель принимает решение о возможности поставить тому или иному студенту учебной группы зачет "автоматом". При этом он руководствуется следующим правилом.

П₁. Если "Посещаемость лекций (x_1)" = "Высокая (A_{11})" ($F_{11} = 0,2$)

И "Лабораторные работы (x_2)" = "Выполнены и защищены (A_{12})" ($F_{12} = 1,0$)

И "Активность на практических занятиях (x_3)" = "Высокая (A_{13})" ($F_{13} = 0,4$)

И "Контрольные работы (x_4)" — "Написаны безупречно (A_{14})" ($F_{14} = 0,8$)

ТО "Можно студенту проставить зачет "автоматом", где F_{11}, \dots, F_{14} — степени значимости соответствующих критериев.

2. Как было показано в ряде исследований (например, в работах [13, 14]), изменяя настройки НЛР, можно в той или иной степени влиять на динамику системы управления. Так, например, изменяя форму функций принадлежности термов входных лингвистических переменных "Рассогласование" и "Производная", можно по отдельности изменять параметры аппроксимирующего ПД регулятора [15]. Однако такой способ представляется довольно трудоемким. Поэтому было бы желательно разработать некоторый механизм, позволяющий непосредственно воздействовать на пропорциональную и дифференциальную составляющие НЛР, как это происходит при настройке линейного ПД регулятора.

В задаче принятия решения возникает вопрос о формализации процедуры оценивания степени истинности предпосылки. Покажем, как можно получить такую оценку на основе известных методов [11, 12, 16].

При выполнении гипотезы о взаимной независимости выходных переменных база нечетких продукционных правил с МИМО-структурой (МИМО — Multiple Input — Multiple Output) и конъюнктивной формой заключения может быть представлена совокупностью L правил с МИСО-структурой (МИСО — Multiple Input — Single Output) со многими (n) входными и одной выходной переменными. В этом случае правила будут иметь следующий вид:

$$\text{П}_l: \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1 \text{ И } \dots \text{ И } x_m \text{ есть } \tilde{A}_n, \\ \text{ТО } y \text{ есть } \tilde{B}_l (F_l), l = \overline{1, L}. \quad (1)$$

В тех случаях, когда подусловия в предпосылке соединены нечеткой логической операцией "ИЛИ" (дизъюнктивная форма), нечеткое правило может быть представлено несколькими правилами. Например, одно правило

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1 \text{ ИЛИ } x_2 \text{ есть } \tilde{A}_2, \\ \text{ТО } y \text{ есть } \tilde{B} (F) \quad (2)$$

можно представить двумя следующими правилами:

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1, \text{ ТО } y \text{ есть } \tilde{B} (F); \quad (3)$$

$$\text{ЕСЛИ } x_2 \text{ есть } \tilde{A}_2, \text{ ТО } y \text{ есть } \tilde{B} (F).$$

Однако очевидно, что степени значимости этих двух правил могут быть различными, т. е. в общем случае можно записать

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1, \text{ ТО } y \text{ есть } \tilde{B} (F_1); \quad (4)$$

$$\text{ЕСЛИ } x_2 \text{ есть } \tilde{A}_2, \text{ ТО } y \text{ есть } \tilde{B} (F_2)$$

или, объединяя эти правила,

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1 (F_1) \text{ ИЛИ } x_2 \text{ есть } \tilde{A}_2 (F_2), \\ \text{ТО } y \text{ есть } \tilde{B}. \quad (5)$$

При этом степень истинности заключения определяется как

$$\mu_B(y) = F_1 \cdot \mu_{A_1}(x_1) \vee F_2 \cdot \mu_{A_2}(x_2). \quad (6)$$

(В данном контексте операция (\cdot) трактуется как Т-норма в алгебраическом логическом базисе [1—3, 14], и она эквивалентна операции умножения на интервале $[0; 1]$.)

Таким образом, при записи предпосылки в дизъюнктивной форме каждому из подусловий можно непосредственно приписывать некоторый весовой коэффициент, отражающий степень его значимости.

Однако если подусловия связаны логической операцией "И" (конъюнктивная форма (1)) и их значимость не одинакова, то степень истинности заключения нельзя получить по аналогии с формулой (6), заменив лишь операцию дизъюнкции на операцию конъюнкции. В этом легко убедиться, рассмотрев, например, случай, когда значимость какого-либо подусловия мала. Тогда степень истинности заключения будет также мала вне зависимости от выполнения других, более важных подусловий. Поэтому предлагается следующий подход. Пусть некоторое правило описывается продукцией

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } \tilde{A}_1 (F_1) \text{ И } x_2 \text{ есть } \tilde{A}_2 (F_2), \\ \text{ТО } y \text{ есть } \tilde{B}. \quad (7)$$

Запишем отрицание этого выражения, применив к нему правило де Моргана:

$$\text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть НЕ } \tilde{A}_1 (F_1) \text{ ИЛИ } x_2 \text{ есть НЕ } \tilde{A}_2 (F_2), \\ \text{ТО } y \text{ есть НЕ } \tilde{B}. \quad (8)$$

Степень истинности заключения в этом случае равна

$$\mu_{\neg B}(y) = F_1 \cdot \mu_{\neg A_1}(x_1) \vee F_2 \cdot \mu_{\neg A_2}(x_2). \quad (9)$$

Студент	$\mu_{A_1}(x_1)$ ($F_1 = 0,2$)	$\mu_{A_2}(x_2)$ ($F_2 = 1$)	$\mu_{A_3}(x_3)$ ($F_3 = 0,4$)	$\mu_{A_4}(x_4)$ ($F_4 = 0,8$)	$\mu_B(y)$	
					Максимальный базис	Алгебраический базис
C1	1	0,5	0,7	0,6	$1 \wedge 0,5 \wedge 0,7 \wedge 0,6 = 0,5$ (0,5)	$1 \cdot 0,5 \cdot 0,88 \times 0,68 = 0,3$ (0,21)
C2	0,6	0,9	0,5	0,8	$0,8 \wedge 0,9 \wedge 0,6 \wedge 0,8 = 0,6$ (0,5)	$0,92 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \times 0,84 = 0,56$ (0,22)
C3	0,2	1	0,3	1	$0,8 \wedge 1 \wedge 0,6 \wedge 0,9 = 0,6$ (0,2)	$0,84 \cdot 1 \cdot 0,72 \times 1 = 0,6$ (0,06)
C4	0,8	0,9	0,8	0,9	$0,8 \wedge 0,9 \wedge 0,8 \wedge 0,9 = 0,8$ (0,8)	$0,96 \cdot 0,9 \cdot 0,92 \times 0,92 = 0,73$ (0,52)

Тогда

$$\begin{aligned} \mu_B(y) &= \neg[F_1 \cdot \mu_{\neg A_1}(x_1)] \wedge \neg[F_2 \cdot \mu_{\neg A_2}(x_2)] = \\ &= [(1 - F_1) + \mu_{A_1}(x_1) - (1 - F_1) \cdot \mu_{A_1}(x_1)] \wedge \\ &\wedge [(1 - F_2) + \mu_{A_2}(x_2) - (1 - F_2) \cdot \mu_{A_2}(x_2)] = \\ &= [1 - F_1(1 - \mu_{A_1}(x_1))] \wedge [1 - F_2(1 - \mu_{A_2}(x_2))]. \end{aligned} \quad (10)$$

Очевидно, что данный подход может быть распространен на предпосылки с любым числом подусловий.

Заметим, что в выражении (10) используются как операция дизъюнкции, так и алгебраическое произведение.

В статье предлагается использование степеней значимости подусловий для произвольного логического базиса. Тогда степень истинности заключения определяется в соответствии с выражением

$$\mu_B(y) = \bigwedge_{i=1}^n [1 - F_i T(1 - \mu_{A_i}(x_i))], \quad (11)$$

где x_i — входные лингвистические переменные; \tilde{A}_i — их нечеткие значения; F_i — степени значимости подусловий ($F_i \in [0; 1]$); y — выходная лингвистическая переменная; \tilde{B} — ее нечеткое значение; $\mu_{A_i}(x_i)$ — степени истинности подусловий; $\mu_B(y)$ — степень истинности заключения; T — заданная операция Т-нормы; n — число подусловий в данном правиле.

В частном случае при выборе максиминного базиса ($aTb = a \wedge b$) выражение (11) принимает вид

$$\begin{aligned} \mu_B(y) &= [1 - F_1 \wedge (1 - \mu_{A_1}(x_1))] \wedge \dots \\ &\dots \wedge [1 - F_2 \wedge (1 - \mu_{A_2}(x_2))]. \end{aligned} \quad (12)$$

При выборе алгебраического базиса ($aTb = ab$)

$$\begin{aligned} \mu_B(y) &= \\ &= [1 - F_1(1 - \mu_{A_1}(x_1))] \cdot \dots \cdot [1 - F_n(1 - \mu_{A_n}(x_n))]. \end{aligned} \quad (13)$$

Вернемся к примеру, рассмотренному выше. На основе степени выполнения этих подусловий и выражения (11) рассчитывается степень уверенности преподавателя в том, что данный студент заслуживает зачета "автоматом" с оценкой "отлично" ($\mu_B(y)$). Эту степень уверенности можно трактовать как рейтинговый балл студента при изучении дисциплины. При этом положительное решение при-

нимается в том случае, если этот балл оказывается выше некоторого порогового значения α . В противном случае он может быть учтен при дальнейшей сдаче зачета.

Некоторые примеры расчета рейтинговой оценки студентов C1, C2, C3, C4 при использовании максиминного (12) и алгебраического (13) базисов приведены в таблице (в скобках указаны степени истинности предпосылки, полученные без учета степени значимости подусловий).

Как можно заметить, степень истинности предпосылки с учетом степеней значимости подусловий оказывается не ниже, чем без их учета. Данный результат, на наш взгляд, в большей мере согласуется с рассуждениями лица, принимающего решения.

Использование степеней значимости подусловий при построении нечеткого ПД регулятора

Оценим возможность использования степеней значимости подусловий при настройке нечеткого логического регулятора (НЛР) для управления динамическими объектами.

В данной статье будем рассматривать 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). Для наглядности выберем объект с достаточно простой передаточной функцией

$$W_o(s) = \frac{K_o}{s(1 + sT_o)}, \quad (14)$$

где $K_o = 2 \text{ с}^{-1}$, $T_o = 0,2 \text{ с}$ — известные параметры объекта.

Здесь $u(t)$ — сигнал на входе системы, $e(t)$ — сигнал рассогласования; $d(t)$ — его производная; $x(t)$ — сигнал управления; $y(t)$ — сигнал на выходе системы; s — оператор Лапласа.

Для описания НЛР введем лингвистические переменные <"Рассогласование" (" e ")>, T_E , E >, <"Про-

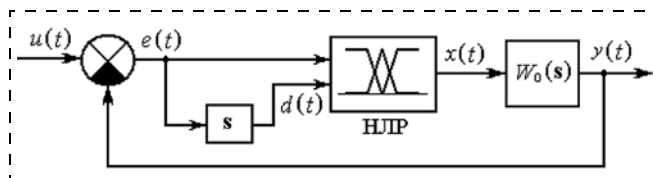


Рис. 1. Структурная схема нечеткой системы управления

изводная" ("d"), T_D, D), ("Управление" ("x"), T_X, X), где $E = [-1; 1]$, $D = [-1; 0]$, $X = [-10; 10]$ — их области определения, $T_E = \{T_E^1, T_E^2, T_E^3\} = \{"-", "0", "+"\}$, $T_D = \{T_D^1, T_D^2, T_D^3\} = \{"-", "0", "+"\}$, $T_X = \{T_X^1, T_X^2, T_X^3\} = \{"-", "0", "+"\}$ — их терм-множества.

В работе [15] для оценки динамических свойств НЛР было предложено использовать его линейную аппроксимирующую модель. В рассматриваемом случае наиболее очевидным представляется выбор

модели в виде форсирующего звена (ПД регулятора) с передаточной функцией

$$W_M(s) = K_{\Pi} + K_D s. \quad (15)$$

Для построения аппроксимирующей модели НЛР и получения ее параметров используем два следующих способа.

1. Определение параметров K_{Π} и K_D по переходным процессам методом экспоненциальной модуляции [17, 18].

2. Параметрическая идентификация на основе частотных характеристик. Параметр K_{Π} определяется

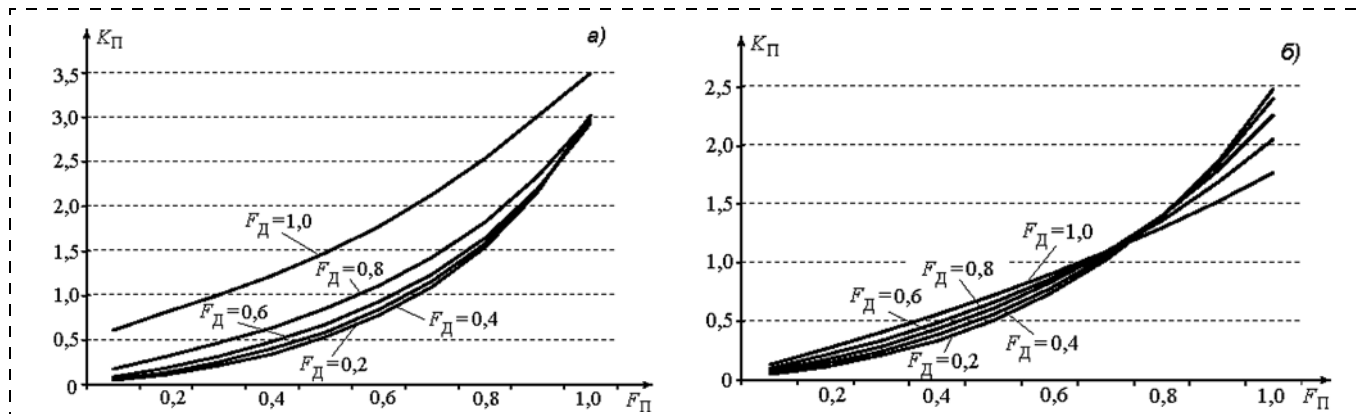


Рис. 2. Зависимости параметра K_{Π} от степени значимости F_{Π} , полученные по переходным процессам (а) и частотным характеристикам (б)

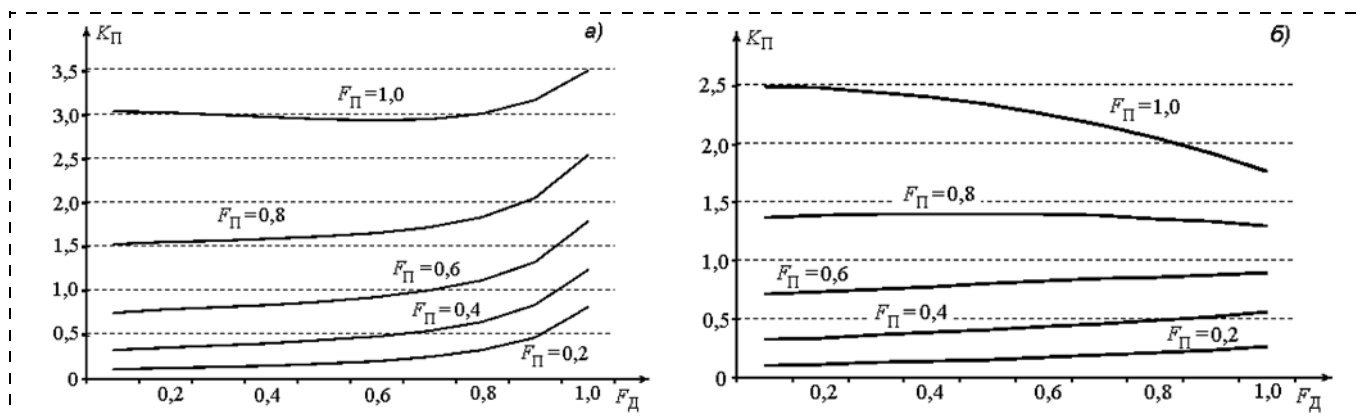


Рис. 3. Зависимости параметра K_{Π} от степени значимости F_D , полученные по переходным процессам (а) и частотным характеристикам (б)

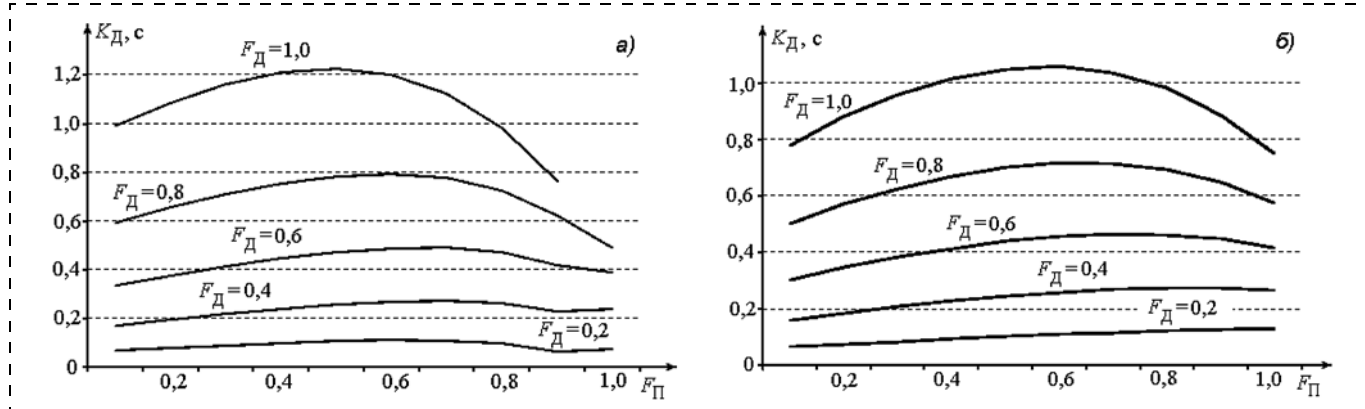


Рис. 4. Зависимости параметра K_D от степени значимости F_{Π} , полученные по переходным процессам (а) и частотным характеристикам (б)

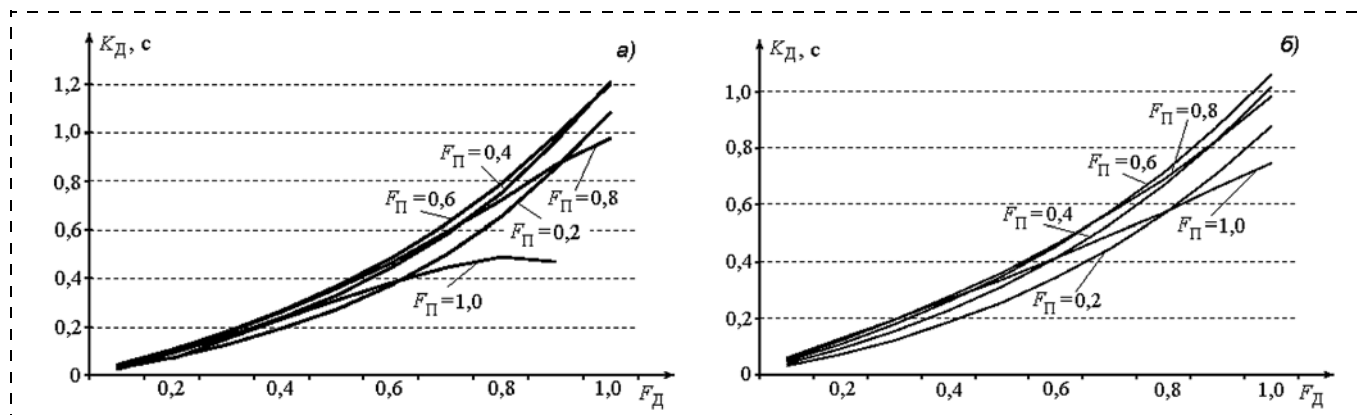


Рис. 5. Зависимости параметра K_D от степени значимости F_D , полученные по переходным процессам (а) и частотным характеристикам (б)

по амплитудно-частотной характеристике на низких частотах ($K_{\Pi} = \lim_{\omega \rightarrow 0} A(\omega)$). Параметр K_D определяется

по фазовой частотной характеристике: $K_D = \frac{K_{\Pi}}{\omega^*}$, где ω^* — частота, на которой фазовый сдвиг $\varphi(\omega^*)$ принимает значение $\frac{\pi}{4}$.

Семейства зависимостей параметров K_{Π} и K_D от степеней значимости F_{Π} и F_D , полученные двумя способами, приведены на рис. 2—5.

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 значимости подусловий, определяющих нечеткие значения каждой из входных лингвистических переменных.

Заметим, что оба способа определения параметров аппроксимирующего ПД регулятора являются приближенными, однако близость представленных зависимостей позволяет судить о достоверности полученных результатов.

Выводы

1. Рассмотрена модификация правил нечеткого логического вывода для случаев, когда подусловия имеют различную значимость.
2. Определена формула для вычисления степени истинности заключения.
3. Проведены исследования влияния степени значимости подусловий на параметры линеаризованной модели НЛР двумя различными способами.
4. Исследования показали, что оба способа показывают схожие результаты.
5. Сделан вывод о целесообразности использования способа настройки НЛР для динамических объектов, основанного на введении степеней значимости подусловий.

Список литературы

1. Анисимов Д. Н. Использование нечеткой логики в системах автоматического управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 8. С. 39—42.
2. 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. 368 с.
3. Батыршин И. З. Основные операции нечеткой логики и их обобщения. Казань: Отечество, 2001. 102 с.
4. Ротач В. Я. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.
5. Анисимов Д. Н., Ситников К. Ю. Методика построения нечетких реляционных систем автоматического управления // Вестник МЭИ. 2012. № 3. С. 77—82.
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 // Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications. M. M. Gupta, Ragade R. K. and Yager R. R. (Eds.). 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.
10. Pedrycz W. Fuzzy Control and Fuzzy Systems. New York: John Wiley and Sons, 1993.
11. Борисов В. В., Круглов В. В., Федюлов А. С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия — Телеком, 2007. 284 с.
12. Леоенков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. С. 178—221.
13. 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.
14. 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.
15. Анисимов Д. Н., Дроздова Е. Д., Новиков В. Н. Построение аппроксимирующей модели нечеткого регулятора на основе идентификации методом экспоненциальной модуляции // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. С. 6—12.
16. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: Бин-ном. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.
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.

Research of the Influence of the Sub-Conditions Measure of Significance on the Dynamic Characteristics of a Fuzzy Logic Controller

D. N. Anisimov, anisimovdn@mpei.ru, **E. D. Drozdova**, drozdovaed@mail.ru,
V. N. Novikov, aximas17@yandex.ru, National Research University
"Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russian Federation

Received on July 23, 2014

Analysis of operation of the fuzzy control systems shows that there are many factors influencing the quality control such as a number of terms of the input and output variables, forms of values of the linguistic variables constituting its term-sets membership functions, character of the fuzzy relation between the antecedent and consequent spaces (rule base), etc. By varying these factors we can change the parameters of the fuzzy controller for achievement of a satisfactory quality control. Comparing the fuzzy controllers with the traditional linear ones (such as PD-, PID-controllers, etc.) one can notice that the parameters of the linear controllers can be tuned separately. But, when we deal with the fuzzy controllers, any variation of the above mentioned factors has a simultaneous influence on the integral, proportional and differential components of a signal. This is due to numerous logical interactions between the input variables. Furthermore, the specific character of the aggregation of the sub-conditions in the most commonly used fuzzy inference algorithms based on the triangular norm operations does not make it possible to take into account the desired force of each component. An approach proposed in the paper makes it possible to vary one of the signal components within a wide range, leaving the other components practically steady. This in turn simplifies tuning of a fuzzy logic controller.

Keywords: fuzzy logic inference, aggregation of sub-conditions, truth degrees, measure of significance, fuzzy controller, approximating model, PD-controller

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 13-01-00082-a

For citation:

Anisimov D. N., Drozdova E. D., Novikov V. N. Research of the Influence of the Sub-Conditions Measure of Significance on the Dynamic Characteristics of a Fuzzy Logic Controller, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 363–368.

DOI: 10.17587/mau.16.363-368

References

1. Anisimov D. N. *Ispol'zovanie nechetkoi logiki v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya* (Fuzzy logic using in automatic control systems), *Priory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2001, no. 8, pp. 39–41 (in Russian).
2. Asai K., Vatada D., Iwai S. i dr. *Prikladnye nechetkie systemy* (Applied fuzzy systems), Moscow, Mir, 1993, 368 p. (in Russian).
3. Batyrshin I. Z. *Osnovnye operatsii nechetkoi logiki i ikh obobshcheniya* (Main operations of fuzzy logic and their generalization), Kazan', Otechestvo, 2001, 102 p. (in Russian).
4. Rotach V. Ja. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (The theory of automatic control: Textbook for institution of higher education), Moscow, Izdatel'skij dom MJeI, 2008, 396 p. (in Russian).
5. Anisimov D. N., Sitnikov K. Ju. *Metodika postroeniya nechetkikh relyatsionnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* (A method of fuzzy relational automatic control systems construction), *Vestnik MJeI*, 2012, no. 3, pp. 77–82 (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, *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.
10. Pedrycz W. *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, New York, John Wiley and Sons, 1993.
11. Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S. *Nechetkie modeli i seti* (Fuzzy models and networks), Moscow, Gorjachaja liniya—Telekom, 2007, 284 p. (in Russian).
12. Leonenkov A. V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* (Fuzzy modeling using MATLAB and fuzzyTECH), SPb., BHV-Peterburg, 2003, p. 178–221 (in Russian).
13. Makarov I. M., Lohin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Sitnikov M. S. *Issledovanie periodicheskikh kolebaniy v sistemakh upravleniya s nechetkimi regulyatorami* (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).
14. Anisimov D. N., Novikov V. N., Safina Je. A., Sitnikov K. Ju. *Issledovanie vliyaniya vybora logicheskogo bazisa na kharakteristiki nechetkogo regulyatora* (Research of logical basis choice influence on fuzzy regulator characteristics), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 8 (149), pp. 12–17 (in Russian).
15. Anisimov D. N., Drozdova E. D., Novikov V. N. *Postroenie approksimiruyushchei modeli nechetkogo regulyatora na osnove identifikatsii metodom eksponentsial'noi modulyatsii* (Construction of fuzzy regulator approximating model based on identification by the method of exponential modulation), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 9 (in Russian).
16. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy modeling and control), Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy, 2009, 798 p. (in Russian).
17. Anisimov D. N. *Identifikatsiya lineinykh dinamicheskikh ob'ektov metodom eksponentsial'noi modulyatsii* (Identification of linear dynamic objects by the method of exponential modulation), *Vestnik MJeI*, 1994, no. 2, pp. 68–72 (in Russian).
18. Anisimov D. N., Hripkov A. V. *Zakony raspredeleniya otsenok parametrov dinamicheskikh ob'ektov pri identifikatsii metodom eksponentsial'noi modulyatsii* (Distribution laws of dynamic objects' parameter estimates in the identification by exponential modulation method), *Problemy Upravleniya*, 2007, no. 4, pp. 18–21 (in Russian).

Corresponding author:

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