

Для цитирования: Абдурагимов Т.Т., Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Информационно-аналитическая модель нечеткого пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (1):48-60. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-1-48-60

For citation: Abduragimov T.T., Melekhin V. B., Hachumov V.M. Information-analytical model for a fuzzy proportional-integral-derivative controller. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (1):48-60. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-1-48-60

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.518

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-1-48-60

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕЧЕТКОГО ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕГО РЕГУЛЯТОРА

Абдурагимов Т.Т.¹, Мелехин В.Б.², Хачумов В.М.³

¹⁻²Дагестанский государственный технический университет

367015, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70

³Институт системного анализа РАН,

117312, г. Москва, пр. 69-летия Октября, 9

e-mail: ¹iron969@mail.com, ²pashka1602@rambler.ru,

³vmh@isa.ru,

Резюме: Цель. Целью исследования является создание модели, позволяющей повысить точность нечетких алгоритмов управления сложными объектами в условиях неопределенности. **Методы.** Разработан способ нечеткого представления и сравнения между собой параметров состояния сложных объектов управления в условиях неопределенности. Предложен принцип реализации информационно аналитической модели пропорционально-интегрально-дифференцирующего закона регулирования параметров состояния сложного объекта на основе лингвистических переменных и лингвистических функций. Разработан способ построения графиков лингвистических функций на основе обработки экспертных данных методами регрессионного анализа. **Результат.** Получена информационно-аналитическая модель нечеткого пропорционально-интегрально-дифференцирующего закона, позволяющая обеспечить требуемую точность регулирования параметров состояния сложного объекта управления в неустойчивой окружающей среде. В работе проведен анализ и обозначен основной недостаток нечетких алгоритмов управления сложными объектами (низкая точность регулирования параметров состояния объекта управления), а также определены основные, связанные с ним, ограничения эффективного их применения. Показано, что к одному из эффективных путей, позволяющих обойти отмеченный недостаток, следует отнести использование в нечетких алгоритмах управления для реализации выбираемых управлений информационно-аналитическую модель пропорционально-интегрально-дифференцирующего закона регулирования параметров состояния сложного объекта. **Вывод.** Предложенный подход позволяет эффективным образом реализовать пропорциональный, интегральный и дифференциальный нечеткие законы регулирования, и на этой основе обеспечить эффективное управление состоянием сложных объектов в недоопределенных и неустойчивых условиях функционирования на основе нечетких алгоритмов управления.

Ключевые слова: сложный объект управления, нечеткий алгоритм управления, лингвистическая переменная, лингвистическая функция, нечеткий пропорционально-интегрально-дифференцирующий закон регулирования (PID-controller)

TECHICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

INFORMATION-ANALYTICAL MODEL FOR A FUZZY PROPORTIONAL-
INTEGRAL-DERIVATIVE CONTROLLER

Timur T. Abduragimov¹, Vladimir B. Melekhin², Vyacheslav M. Khachumov³

¹⁻²Daghestan state technical university

70 I.Shamilya Ave., 70367015 Makhachkala, Russia

³Institute system analysis by wounds,

69 years of the October Ave., Moscow 117312, Russia

e-mail: ¹iron969@mail.com, ²pashka1602@rambler.ru, ³vmh@isa.ru,

Abstract. Objectives The aim of the study is to create a model allowing us to improve the accuracy of fuzzy control algorithms for complex objects in conditions of uncertainty. **Methods** An approach of fuzzy representation and comparison of the state parameters of complex objects of control in conditions of uncertainty has been developed. The principle of realisation of information-analytical model of proportional-integral-derivative law of regulation of state parameters of a complex object on the basis of linguistic variables and linguistic functions is proposed. A method for constructing graphs of linguistic functions is developed on the basis of expert data processing using regression analysis methods. **Results** An information-analytical model for a fuzzy proportional-integral-derivative law is constructed that allows a satisfactory level of accuracy for the regulation of the state parameters of a complex control object in an unstable environment to be achieved. The main drawback of fuzzy algorithms for managing complex objects (low accuracy in regulation of the state parameters of the control object) is identified and major limitations associated with their effective use are analysed. It is shown that one of the most effective means of circumventing the noted shortcoming is the use of the information-analytical model of the proportional-integral-derivative law of the state parameters of a complex object with fuzzy control algorithms used to implement selectable controls. **Conclusion** The proposed approach allows the proportional, integral and derivative fuzzy laws of regulation to effectively control the state of complex objects under undetermined and unstable operating conditions based on fuzzy control algorithms provided on this basis.

Keywords: complex control object, fuzzy control algorithm, linguistic variable, linguistic function, fuzzy proportional-integral-derivative control law (PID-controller)

Введение. Для управления сложными объектами в нестабильной окружающей среде (ОС), когда построение адекватных аналитических моделей затруднено или невозможно в силу высокой неопределенности характера влияния на объект управления (ОУ) возмущающих факторов ОС, на практике широко используются нечеткие алгоритмы управления продукционного типа, формируемые на основе экспертных данных [1-8].

Как правило, в таких алгоритмах управления для сокращения количества продукции, допустимые состояния ОУ $S = \{S_i\}, i = 1, 2, \dots, n_1$, скорость изменения параметров состояния $V = \{v_j\}, j = 1, 2, \dots, m$ и управления $B_i \in B = \{B_i\}, i = 1, 2, \dots, n_1 \times m$ определяются в нечеткой форме или интервальным способом представления с помощью термов лингвистических переменных (ЛП) [9]. Данное обстоятельство и определяет основной недостаток нечетких алгоритмов управления, связанный с низкой точностью регулирования параметров состояния ОУ. Основной проблемой этого недостатка является то, что с помощью нечетких алгоритмов управления практически достаточно эффективно реализуется только пропорциональный закон регулирования параметров состояния ОУ [10-15].

Отмеченный выше недостаток нечетких алгоритмов управления, несмотря на простоту реализации, не позволяет эффективно их использовать в случаях, когда:

- к точности желаемого состояния ОУ предъявляются повышенные требования;

- наблюдается высокая динамика изменения регулируемых параметров состояния ОУ под внешними воздействиями;
- не допустимым является относительно большое запаздывание в силу высокой динамики изменения параметров состояния ОУ, т.е. требуется перевести объект управления в заданное состояние в реальном времени во избежание возникновения аномальных ситуаций.

Постановка задачи. В работе предлагается обойти отмеченный выше недостаток нечетких алгоритмов управления на основе информационно-аналитической модели нечеткого ПИД закона регулирования, позволяющего эффективным образом сформировать и реализовать пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие выбираемых на их основе управлений. В основе решения данной задачи предлагается использовать ЛП и лингвистические функции (ЛФ) [16], позволяющие построить приближительную аналитическую зависимость между значениями параметров состояния объекта управления и управляющими воздействиями, обеспечивающими возможность регулирования данных параметров в нестабильных условиях окружающей среды.

Следует отметить, что в общем случае изменение состояний ОУ может происходить: по заданной программе функционирования, изменяющейся во времени и сводящейся к отработке заданных в ней управлений $B_{i2} \in B$; в результате возмущающих факторов ОС, негативным образом влияющих на состояние ОУ; на основе управлений $B_{i2} \in B$, выполняемых системой управления для перевода ОУ в требуемое на текущий момент времени состояние, которое он покинул под воздействием возмущающих факторов ОС и за счет влияния изменений одних параметров состояния на значения других параметров ОУ.

Таким образом, в общем случае целесообразно исследовать способы построения информационно-аналитической модели ПИД закона регулирования для ОУ двух типов: с происходящими и не происходящими в них изменениями параметров состояния в результате их взаимного влияния друг от друга.

Методы исследования. Нечеткая модель описания и сравнения между собой состояний объекта управления. В общем случае текущие фактические $S_i(t) \in S$ и целевые $S_j^*(t) \in S$, состояния ОУ можно определить соответственно кортежами $\langle a_1, a_2, \dots, a_{i2}, \dots, a_m \rangle$ и $\langle a_1^*, a_2^*, \dots, a_{i2}^*, \dots, a_m^* \rangle$ значений параметров состояния $A = \{a_{i2}\}, i_2 = 1, 2, \dots, m$, где a_{i2}, a_{i2}^* соответственно фактическое и целевое значение i_2 -го параметра состояния ОУ в текущий момент времени. Это позволяет сформировать проблемные на текущий момент времени состояния ОУ $S_{j2}(T) = \langle \Delta a_1^{j2}, \Delta a_2^{j2}, \dots, \Delta a_{i2}^{j2}, \dots, \Delta a_m^{j2} \rangle, j_2 = 1, 2, \dots, n_3$, и сформировать на их основе продукции нечеткого алгоритма управления состояниями сложного объекта имеющие, например, следующее содержание:

«Если текущее состояние ОУ определяется проблемным состоянием $S_{j2}(t)$, а целевым является состояние $S_j^(t)$, то в случае низкой скорости изменения отклонений следует сформировать и реализовать управление $B_{j2} \in B$ »,* (1)

где $\Delta a_{i2}^{j2} = a_{i2}^* - a_{i2}$ - недопустимое отклонение фактического значения i_2 -го параметра состояния от его целевого значения.

Для обобщенного описания различных состояний ОУ и сравнения между собой значений входящих в них параметров с целью определения отклонений, используем соответствующие им ЛП $R = \{R_{i2}\}, i_2 = 1, 2, \dots, m$. Каждая такая ЛП определяется следующей четверкой:

$$R_{i2} = (H_{i2}, T_{i2}, U_{i2}, r_{i2}),$$

Где H_{i2} - название ЛП, которое совпадает с названием соответствующего ей параметра состояния ОУ, например, «Температура состояния ОУ»; $T_{i2} = \{T_{i2}(k)\}, k = 1, 2, \dots, 5$ - термножество или множество словесных (нечетких) значений ЛП, например, $T_{i2} = \{\text{«очень низкая»}, \text{«низкая»}, \text{«средняя»}, \text{«высокая»}, \text{«очень высокая температура»}\}$; $U_{i2} \in [a_{i2}^H, a_{i2}^B]$ - базовое множество значений ЛП, которое определяет шкалу ее численных значений соответственно с

нижней a_{i2}^H и верхней A_{i2}^H границами. Данная шкала в соответствии с количеством и названием термов ЛП разбивается на пять непересекающихся интервалов с четкими границами, внутри каждого из которых определяется нечеткое множество значений параметров состояния $a_{i2} \in A_{OU}$.

Таким образом, ограничения, определяемые термами $T_{i2}(k) \in T_{i2}$ ЛП R_{i2} и накладываемые на значения базовой переменной r_{i2} регулируемого параметра a_{i2} , задаются четко и выбираются исходя из предельных эксплуатационных характеристик ОУ или на основе данных опроса экспертов; r_{i2} - базовая переменная ЛП, или конкретное значение соответствующего ей параметра состояния a_{i2} ОУ, т.е. $r_{i2} = a_{i2}$.

Это позволяет каждое значение регулируемого параметра $a_{i2} \in A_{OU}$ представить парой $a_{i2} = \langle r_{i2}, T_{i2}(k) \rangle$, где $T_{i2}(k)$ - нечеткое значение параметра состояния или терм, в интервал численных значений которого попадает величина r_{i2} его базовой переменной.

В свою очередь, такое представление различных значений регулируемых параметров ОУ позволяет сравнивать между собой соответствующие им пары без привлечения для этого операции нечеткой эквивалентности, требующей выполнения трудоемких операций определения минимума и максимума [17].

Для нечеткого представления значений параметров состояния ОУ, как правило, измеряемых датчиками в количественной форме, используем преобразования вида [18]:

$$\psi: r_{i2} \rightarrow \begin{cases} T_{i2}(1), \text{ если } 0 < r_{i2} \leq r_1^*; \\ T_{i2}(k) \text{ если } r_{k-1}^* \leq r_{i2} < r_k^*; \\ \dots\dots\dots \\ T_{i2}(5) \text{ если } r_{5-1}^* \leq r_{i2} < r_5^*, \end{cases} \quad (2)$$

позволяющие каждой базовой переменной r_{i2} регулируемого параметра состояния, определяемого лингвистической переменной R_{i2} , поставить в соответствие один из ее термов $T_{i2}(k), k = 1, 5$, где r_{k-1}^*, r_k^* - соответственно нижняя и верхняя границы числовых значений терма $T_{i2}(k)$.

В этом случае степень нечеткого равенства $\rho(r_{i2}^1, r_{i2}^2)$ двух значений $a_{i2}^1 = r_{i2}^1$ и $a_{i2}^2 = r_{i2}^2$ регулируемого параметра, представленных соответственно парами $\langle r_{i2}^1, T_{i2}^1(k_1) \rangle$ и $\langle r_{i2}^2, T_{i2}^2(k_2) \rangle$, будем определять согласно следующему характеристическому уравнению:

$$\rho(r_{i2}^1, r_{i2}^2) = \begin{cases} 1, \text{ если } |r_{i2}^1 - r_{i2}^2| \leq \varepsilon; \\ 1 - \frac{|r_{i2}^1 - r_{i2}^2|}{r_k^* - r_{k-1}^*}, \text{ если } (T_{i2}^1(k_1) = T_{i2}^2(k_2)); \\ 0, \text{ если } R_{i2}^1(k_1) \neq R_{i2}^2(k_2), \end{cases} \quad (3)$$

где ε - величина допустимого значения отклонения фактического значения параметра $r_{i2}^1 = a_{i2}$ от заданного его значения $r_{i2}^2 = a_{i2}^*$, определяемая согласно требуемой точности решения задачи (допустимая ошибка регулирования в установившемся режиме); $|r_{i2}^1 - r_{i2}^2|$ - абсолютная величина разности.

Полагаем, что сравниваемые значения r_{i2}^1, r_{i2}^2 параметра a_{i2} равны между собой, если $\rho(r_{i2}^1, r_{i2}^2) = 1$, т.е. оба значения параметра состояния попадают в заданную окрестность ε одной и той же точки на шкале допустимых численных значений ЛП.

Сравниваемые значения параметра a_{i2} нечетко равны при $0 < \rho(r_{i2}^1, r_{i2}^2) < 1$, т.е. если они попадают в интервал значений одного и того же терма ЛП. В этом случае оценка степени равенства определяется по их относительной удаленности от центра тяжести функции принадлежности. Наконец, сравниваемые значения параметра состояния $a_{i2} \in A_{OU}$ не равны между собой, если степень их нечеткого равенства принимает значение $\rho(r_{i2}^1, r_{i2}^2) = 0$, т.е. они попадают в интервалы численных значений различных термов.

Тогда, если в качестве критерия эффективности регулирования параметров состояния $a_{i2} \in A$ ОУ принять значение степени нечеткого равенства $\rho(r_{i2}, r_{i2}^*)$, равное 1, то задача сводится к построению и реализации управлений $B_{i2} \in B$, позволяющих обеспечить такие текущие r_{i2} значения данных параметров, при которых соответствующая им степень равенства, равна 1, где r_{i2} и r_{i2}^* - соответственно текущее и требуемое на данный момент времени значения регулируемого параметра a_{i2} [18-20].

Построение информационно-аналитической модели нечеткого ПИД закона регулирования при отсутствии взаимного влияния параметров состояния друг на друга. Сформулируем задачу построения информационно-аналитической модели нечеткого закона ПИД регулирования при отсутствии у ОУ взаимного влияния параметров состояния друг на друга.

Пусть текущее целевое $S^*(t)$ состояние ОУ определяется кортежем его параметров следующего вида: $S^*(t) = \langle \langle r_{i2}^*(t), T_{i2}^*(k^*) \rangle, i_2 = 1, 2, \dots, m \rangle$, где r_{i2}^* - текущее целевое количественное значение i_2 -го параметра состояния ОУ, которое попадает в интервал численных значений терма $T_{i2}^*(k^*)$.

Фактическое состояние ОУ в данный момент времени определяется кортежем следующего вида: $S(t) = \langle \langle r_{i2}(t), T_{i2}(k) \rangle, i_2 = 1, 2, \dots, m \rangle$, где $r_{i2}(t)$ - фактическое значение i_2 -го параметра состояния ОУ, попадающее в интервал численных значений терма $T_{i2}^1(k)$.

Тогда в процессе сравнения между собой значений одноименных параметров $a_{i2} \in A$ в кортежах $S^*(t)$ и $S(t)$ для построения текущего проблемного состояния ОУ и выбора на его основе управлений $B_{i2} \in B$ по нечеткому алгоритму управления, состоящему из продукций вида (1), может возникнуть следующих три случая.

1. Когда хотя бы для одного из параметров состояния ОУ, его сравниваемые значения попадают в интервалы численных значений различных термов, а скоростью $v(\Delta a_{i2}) = (\Delta r_{i2}(t_2) - \Delta r_{i2}(t_1)) / (t_2 - t_1)$ изменения текущего значения отклонения данного параметра можно пренебречь. Другими словами, степень равенства сравниваемых значений анализируемого параметра состояния $\rho(r_{i2}(t), r_{i2}^*(t))$, равна 0, где $r_{i2}(t), r_{i2}^*(t)$ - значения параметра $a_{i2} \in A$ соответственно в фактическом и целевом состоянии ОУ. В этом случае управление $B_{i2} \in B$, позволяющее обеспечить требуемую точность регулирования данного параметра управления, должно состоять из двух составляющих: пропорциональной - $B_{i2}(\Pi)$ и интегральной - $B_{i2}(\text{И})$.

Другими словами, нечеткому ПИД регулятору достаточно реализовать пропорционально-интегральный закон регулирования искомого параметра состояния. При этом, на первом шаге регулирование текущего значения параметра состояния осуществляется на основе пропорциональной составляющей выбранного управления $B_{i2} \in B$, а на втором – интегральной его составляющей.

Задача пропорциональной составляющей $B_{i2}(\Pi)$ управления $B_{i2} \in B$ в этом случае сводится к такому изменению параметра управления, при котором он принимает значение $r_{i2}(t)$, попадающее в интервал численных значений одного и того же терма, что и его целевое $r_{i2}^*(t)$ значение, т.е. когда для него выполняется условие: « $0 < \rho(r_{i2}(t), r_{i2}^*(t)) \leq 1$ ».

Интегральная же составляющая управления $B_{i2}(\text{И})$ в этом случае должна обеспечить такое текущее значение $r_{i2}^{**}(t)$ параметра управления a_{i2} , для которого выполняется условие: « $|r_{i2}^{**}(t) - r_{i2}^*(t)| \leq \varepsilon$ », т.е. значение степени равенства $\rho(r_{i2}^{**}(t), r_{i2}^*(t)) = 1$.

Например, пусть в качестве исполнительного механизма в нечетком ПИД регуляторе параметра управления $a_{i2}(t)$ используется реверсивный шаговый двигатель. Тогда пропорциональная составляющая $B_{i2}(\Pi)$ в данном регуляторе параметра управления $a_{i2}(t)$ реализуется путем непрерывного исполнения шаговым двигателем такого количества шагов, которое является пропорциональным разности $(k^* - k)$, где (k^*, k) - номера термов, в интервалы численных значений которых попадают соответственно целевое и текущее значения регулируемого параметра ОУ. Знак разности в этом случае позволяет определить направление вращения шагового двигателя.

Выполнение же интегральной составляющей $B_{i2}(И)$ управления $B_{i2} \in B$ в процессе регулирования, например, параметра состояния $a_{i2}(t)$ реализуется на основе шагового режима работы двигателя с проверкой выполнения условия: « $\rho(r_{i2}^{**}(t), r_{i2}^*(t)) = 1$ » после исполнения каждого шага вращения. После выполнения условия « $\rho(r_{i2}^{**}(t), r_{i2}^*(t)) = 1$ » регулирование параметра $a_{i2}(t)$ прекращается, т.к. цель управления считается достигнутой.

2. Когда при сравнении между собой значений одноименных параметров в состояниях $S(t)$ и $S^*(t)$ хотя бы для одного из них выполняется условие: « $0 < \rho(a_{i2}(t), a_{i2}^*(t)) \leq 1$ », а скоростью v изменения текущего значения отклонения данного параметра можно пренебречь.

В этом случае для выбранного управления $B_{i2} \in B$ нечеткому ПИД регулятору достаточно сформировать и реализовать только интегральную составляющую $B_{i2}(И)$ найденного управления. Данная составляющая реализуется в виде итерационного процесса доведения регулируемого параметра состояния до требуемого значения путем изменения управления на каждом его шаге на заданное приращение до тех, пока для текущего значения $r_{i2}^{**}(t)$ регулируемого параметра $a_{i2}(t)$ не будет выполнено условие: « $(r_{i2}^{**}(t), r_{i2}^*(t)) = 1$ ».

3. Значения всех степеней близости $\rho(a_{i2}(t), a_{i2}^*(t))$ для сравниваемых значений одноименных параметров управления в состояниях $S(t)$ и $S^*(t)$ равны единице. В этом случае система ситуационного управления не предпринимает никаких действий, но продолжает контролировать состояние технологического процесса.

Рассмотрим случай, когда скорость $v(\Delta a_{i2}) = (\Delta r_{i2}(t_2) - \Delta r_{i2}(t_1))/(t_2 - t_1)$ изменения отклонения параметра состояния $a_{i2}(t)$ ОУ является недопустимо высокой. Тогда возникает необходимость в отработке постоянно действующей дифференциальной $B_{i2}(Д)$ составляющей управления $B_{i2} \in B$, компенсирующей влияние возмущающего фактора ОС на ОУ в течение всего периода его проявления.

Данная составляющая управления в общем виде определяется следующим образом $B_{i2}(Д) = fv(\Delta a_{i2}(t))$.

Для эффективной реализации в нечетком ПИД законе регулирования параметров состояния $a_{i2} \in A$ ОУ пропорциональных составляющих $B_{i2}(П)$ управлений $B_{i2} \in B$ целесообразно построить и использовать графики ЛФ [16], представляющие собой аналитическую зависимость между отклонениями параметров управления Δa_{i2} и устраняющими их управлениями $B_{i2}(П)$ следующего вида:

$$\Delta a_{i2} = k_{i2} B_{i2}(П), i_2 = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

где k_{i2} - коэффициенты пропорциональности эмпирической модели (4).

В общем случае каждая ЛФ определяется следующей пятеркой:

$$H_{ЛФ}, ЛП_{3П}, \{ЛП_H(i), i = 1, 2, \dots, n\}, M, F,$$

где $H_{ЛФ}$ - название лингвистической функции; $ЛП_{3П}$ - зависимая лингвистическая переменная; $\{ЛП_H(i)\}$ - множество независимых ЛП; M - матрица соответствий между нечеткими значениями зависимой ЛП и нечеткими значениями независимых ЛП, которые определяются термами данных переменных; F - график ЛФ, представляющий собой аналитическую зависимость $a_{3П} = f(a_H^1, a_H^2, \dots, a_H^n)$ между значениями $a_{3П}$ зависимой ЛП и значениями $a_H^i, i = 1, 2, \dots, n$ независимых ЛП.

Для построения графиков лингвистических функций (4) определим для каждой пропорциональной составляющей $B_{i2}(П)$ управлений $B_{i2} \in B$ элементы их терм множества $T_{i2} = \{T_{i2}(j)\}, j = 1, 2, \dots, 5$, словесные (нечеткие) значения которых задаются следующими термами: «очень малая», «малая», «средняя», «большая» и «очень большая величина управления». Это позволяет на основе экспертных данных установить соответствие между нечеткими значениями отклонений Δa_{i2} параметров управления $a_{i2} \in A$ и нечеткими значениями соответствующих им управлений $B_{i2}(П)$, например, (табл.1).

Таблица 1. Соответствие между нечеткими значениями отклонений Δa_{i2} параметра управления a_{i2} и нечеткими значениями соответствующего ему управления $B_{i2}(II)$
Table 1. Correspondence between fuzzy values of deviations of the control parameter and fuzzy values of the corresponding control

Δa_{i2}	Очень малое	Малое	Среднее	Большое	Очень большое
$B_{i2}(II)$	Очень малая	Малая	Средняя	Большая	Очень большая

Используя правило перехода от нечетких значений различных ЛПП по максимуму функции принадлежности нечетких множеств соответствующих ее термам, можно по данным табл.1 сформировать соответствие между количественными значениями отклонений Δa_{i2} параметров состояния $a_{i2} \in A$ и количественными значениями b_{i2} соответствующих им управлений $B_{i2}(II)$ (табл. 2).

Таблица 2. Соответствие между количественными значениями отклонений $\Delta a_{i2}(j)$ параметра управления a_{i2} и количественными значениями соответствующего ему управления $b_{i2}(j), j=1,2,\dots,5$

Table 2. Correspondence between the quantitative values of deviations of the control parameter and the quantitative values of the corresponding control (j), j = 1,2, ..., 5

Δa_{i2}	$\Delta a_{i2}(1)$	$\Delta a_{i2}(2)$	$\Delta a_{i2}(3)$	$\Delta a_{i2}(4)$	$\Delta a_{i2}(5)$
$B_{i2}(II)$	$b_{i2}(1)$	$b_{i2}(2)$	$b_{i2}(3)$	$b_{i2}(4)$	$b_{i2}(5)$

Обработав полученные в табл.2 данные методами регрессионного анализа [20], можно построить графики лингвистических функций, или эмпирические аналитические зависимости (4). Полученные таким образом приближенные аналитические выражения или графики лингвистических функций позволяют сформировать логико-трансформационные правила вывода нечетких алгоритмов управления таким образом, чтобы они позволяли выявлять не только вид управлений $B_{i2}(II)$, но и их количественные характеристики по наблюдаемым значениям отклонений параметров состояния ОУ.

После выявления и реализации пропорциональной составляющей $B_{i2}(II)$ выбранного управления $B_{i2} \in B$ на основе графика соответствующей ему ЛФ, для достижения требуемой точности регулирования, как правило, реализуется его интегральная составляющая $B_{i2}(II)$. Реализация интегральной составляющей $B_{i2}(II)$ выбранного управления $B_{i2} \in B$ сводится к построению итерационного процесса его изменения с шагом, который определяется техническими характеристиками исполнительного механизма нечеткого регулятора каждого параметра состояния. Например, приращение управления может определяться одним шагом шагового двигателя исполнительного устройства и т.д.

В случае наличия в ОС постоянно действующего возмущающего фактора, приводящего к недопустимо высокой скорости изменения хотя бы одного параметра состояния ОУ, требуется реализация дифференциальной составляющей $B_{i2}(D)$ соответствующего ему управления $B_{i2} \in B$, постоянно действующей на период действия возмущающего фактора ОС. Для построения дифференциального закона регулирования формируются ЛФ, в которых роль независимой переменной выполняют дифференциальные составляющие $B_{i2}(D)$ выбранных управлений $B_{i2} \in B$, а независимой переменной – скорость изменения отклонения $v(\Delta a_{i2})$ регулируемого параметра.

График F ЛФ в этом случае строится по выше описанному принципу обработки экспертных данных и определяется в общем виде аналитической зависимостью $B_{i2}(D) = f(v(\Delta a_{i2}(t)))$.

Построение информационно-аналитической модели нечеткого ПИД закона регулирования при наличии взаимного влияния параметров состояния друг на друга. Сформулируем методики построения и реализации пропорциональной $B_{i_2}(P)$, интегральной $B_{i_2}(I)$ и дифференциальной $B_{i_2}(D)$ составляющих, выбираемых на основе нечетких алгоритмов управлений $B_{i_2} \in B$ при взаимном влиянии параметров состояния $a_{i_2} \in A$ ОУ друг на друга.

Следует отметить, что если имеется возможность разбиения множества параметров состояния ОУ A на классы $A_k, A_k \subset A, k=1,2,\dots,m_5$, в каждом из которых принадлежащие им параметры управления влияют друг на друга, то это значительным образом позволяет сократить размерность, как нечеткого алгоритма управления, так и размерность задач, решаемых в процессе формирования управлений. Если такое разбиение невозможно, то задача решается в общем виде при условии, что $m_5 = m, k=1, A_k = A$. В этом случае значения отклонений каждого параметра управления $a_{i_2} \in A$ можно выразить аналитической зависимостью следующего вида:

$$\Delta a_{i_2}(t) = f_{i_5}(\Delta a_1(t), \Delta a_2(t), \dots, \Delta a_d(t), B), i_2 = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Используя графики ЛФ (4) аналитическую зависимость (5) можно представить в виде графиков лингвистических функций следующего вида:

$$\Delta a_{i_2}(t) = h_1(k_1 B_{i_2}^1(P)) + h_2(k_2 B_{i_2}^2(P)) + \dots + h_m(k_m B_{i_2}^m(P)), i_2 = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где $h_{i_2}, i_2 = 1, 2, \dots, m$ - коэффициенты пропорциональности, интерпретируемые как степени влияния пропорциональных составляющих $B_{i_2}(P)$ управлений $B_{i_2} \in B$ на отклонения параметров $a_{i_2} \in A$, которые определяются по данным, полученным экспертным путем.

Для определения коэффициентов пропорциональности $h_{i_2}, i_2 = 1, 2, \dots, m$ для всех управлений $B_{i_2} \in B$ определяется одна и та же ЛП с названием «Степень влияния управлений $B_{i_2} \in B$ на параметры состояния $a_{i_2} \in A$ ». В этом случае базовая шкала значений данной ЛП изменяется от 0 до 1 и разбивается экспертным путем на пять нечетких интервалов, определяемых терминами: «очень слабое влияние», «слабое влияние», «среднее влияние», «сильное влияние» и «очень сильное влияние».

Затем, по вышеописанному принципу построения ЛФ путем обработки экспертных данных, формируются их графики (6), отражающие изменения отклонений в результате отработки пропорциональных составляющих $B_{i_2}(P)$ управлений $B_{i_2} \in B$, выбираемых по заданному нечеткому алгоритму управления. В данном случае отклонения играют роль зависимых ЛП, а управления - независимых лингвистических переменных.

Затем на основании уравнений (6) формулируется следующая многокритериальная многофакторная задача оптимального управления. Найти такие компромиссные значения пропорциональных составляющих $B_{i_2}(P)$ для всех управлений $B_{i_2} \in B$, при которых отклонения $\Delta a_{i_2}, i_2 = 1, 2, \dots, m$ принимают компромиссные минимальные значения. Решить данную задачу можно, например, методом многокритериальной оптимизации по Парето [21].

При необходимости, дальнейшее повышение точности текущих значений параметров состояния $a_{i_2} \in A$ ОУ можно обеспечить путем реализации интегральных составляющих $B_{i_2}(I)$ соответствующих им управлений $B_{i_2} \in B$. Для реализации интегральных составляющих нечеткого регулятора параметров состояния ОУ будем исходить из следующих соображений. Очевидно, что степень h_{i_2} влияния «собственного» управления B_{i_2} на параметр состояния a_{i_2} значительно выше (для «собственного» управления B_{i_2}

параметра a_{i_2} она, как правило, определяется в матрице ЛФ термом «очень сильное влияние» и в уравнениях (6) принимает значение близкое к 1).

Отсюда, можно утверждать, что скорость изменения значений отклонений Δa_{i_2} параметров $a_{i_2} \in A$ под действием «собственного» управления значительно выше, чем скорость их изменений под воздействием «чужих» управлений $B_{i_2}^* \in B$.

Обсуждение результатов. Следовательно, организовав итерационный процесс реализации интегральных составляющих $B_{i_2}(И)$ управлений $B_{i_2} \in B$ методом покоординатного спуска (подъема) в прямоугольной системе координат [21], в которой координаты определяются различными управлениями, можно за конечное число итераций получить допустимые отклонения регулируемых параметров состояния $a_{i_2} \in A$ сложного ОУ.

Дифференциальные $B_{i_2}(Д)$ или компенсационные составляющие управлений $B_{i_2} \in B$, с учетом их влияния на каждый параметр состояния $a_{i_2} \in A$ ОУ при недопустимой скорости изменения их отклонений $v(\Delta a_{i_2})$, в первом приближении могут определяться по графикам соответствующих им ЛФ следующего вида: $B_{i_2}(П) = \sum_{j=1}^m k_j^{i_2}(П) v(\Delta a_j)$, где $k_j^{i_2}(Д)$, $j = 1, 2, \dots, m$ - коэффициенты пропорциональности регрессионной модели графиков ЛФ, построенной путем обработки данных экспертного опроса.

В данном случае в качестве независимых ЛП при формировании графиков соответствующих ЛФ рассматриваются ЛП, определяющие дифференциальные составляющие $B_{i_2}(Д)$ управлений $B_{i_2} \in B$, а зависимые ЛП соответствуют скоростям $v(\Delta a_{i_2})$, $i_2 = 1, 2, \dots, m$ изменения отклонений параметров состояния $a_{i_2} \in A$ ОУ.

Более точно дифференциальные $B_{i_2}(Д)$ составляющие управлений $B_{i_2} \in B$ можно определить путем решения задачи оптимального управления в следующей постановке. «Определить такие оптимально-компромиссные значения дифференциальных составляющих $B_{i_2}(Д)$, $i_2 = 1, 2, \dots, m$ управлений $B_{i_2} \in B$ по Парето, которые позволяют обеспечить минимальные (допустимые) значения скоростей $v(\Delta a_{i_2}) \rightarrow \min$ изменения параметров состояния под действием возмущающих факторов ОС». Для решения данной задачи на основе экспертных данных формируются ЛФ, графики которых в общем виде можно определить следующим образом:

$$v(\Delta a_{i_2}) = f_{i_2}(v(\Delta a_1) = f_1(B_1(Д)), v(\Delta a_2) = f_2(B_2(Д)), \dots, v(\Delta a_m) = f_m(B_m(Д))), i_2 = 1, 2, \dots, m. (7)$$

Затем использовать аналитические выражения данных графиков в качестве минимизируемых критериев эффективности процесса регулирования соответствующих им параметров состояния ОУ.

Для построения аналитической зависимости графиков такого вида ЛФ на основе экспертных данных путем их обработки методами регрессионного анализа, вначале формируются графики $v(\Delta a_{i_2}) = k_{i_2}^* B_{i_2}(Д)$ лингвистических функций, определяющие зависимость между скоростью $v(\Delta a_{i_2})$ изменения отдельных параметров состояния $a_{i_2} \in A$ ОУ и дифференциальными составляющими $B_{i_2}(Д)$ соответствующих им управлений $B_{i_2} \in B$, где $k_{i_2}^*$ - коэффициенты пропорциональности соответствующей регрессионной модели, построенной на основе экспертных данных.

Затем, на основе экспертных данных, обработанных по ранее описанному принципу, формируются аналитические зависимости графиков (7), представляющие собой

регрессионные модели следующего вида: $v(\Delta a_{i_2}) = \sum_{j=1}^m k_j^*(i_2) k_j^* B_j(D)$, где коэффициенты пропорциональности $k_j^*(i_2)$, которые изменяются от 0 до 1 и интерпретируются как степень влияния дифференциальных составляющих $B_j(D)$ на скорость $v(\Delta a_{i_2})$ изменения параметра состояния $a_{i_2} \in A$ ОУ.

Вывод. Резюмируя вышеизложенное, можно сформулировать следующие выводы.

1. Предложенный способ нечеткого представления и сравнения проблемных состояний сложных объектов управления позволяет сократить число продукционных правил вывода в нечетких алгоритмах управления, и на этой основе повысить оперативность принимаемых автоматическим образом управленческих решений.

2. Разработанный метод построения аналитической зависимости графиков ЛФ в виде эмпирических математических моделей, сформированных на основе экспертных данных путем их обработки методами регрессионного анализа, позволяет эффективным образом реализовать нечеткий ПИД закон регулирования параметров состояния сложного ОУ и таким образом обеспечить его устойчивое функционирование в нестабильной окружающей среде.

3. Построенная в работе информационно-аналитическая модель нечеткого ПИД закона регулирования обеспечивает возможность организовать эффективное управление состоянием сложных объектов в недоопределенных и нестабильных условиях функционирования.

4. Моделирование на ЭВМ практического использования, предложенной информационно-аналитической модели нечеткого пропорционально-интегрального закона регулирования в системе управления расходом воды гидроагрегатами ГЭС по заданной суточной программе (при следующих параметрах состояния ОУ: диаметр трубопровода изменяется от 0 при закрытом гидравлическом затворе до 5 м при полностью открытом гидравлическом затворе; значение расхода воды может изменяться в пределах от 0 до 150 м³/сек.), показало возможность экономии расхода воды в течение года до 3% за счет повышения точности регулирования и получения в результате этого экономического эффекта до 17 млн. рублей в год.

Библиографический список:

1. Хижняков Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени. – Пермь: ПНИПУ, 2013. -169 с.
2. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. - 2-е изд. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. - 798 с.
3. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximations // IEEE Transactions on Computers. Vol. 43/ № 11, November 1994. – P. 1329-1333.
4. Cordon O., Herrera F., A General study on genetic fuzzy systems // Genetic Algorithms in engineering and computer science, 1995. – P. 33-57.
5. Sivanandam S.N., Sumathi S., Deepa S.N. Introduction to fuzzy logic using Matlab. - Berlin: Springer, 2007. - 430 p.
6. Kato M., Yamamoto T., Fujisawa S. A skill based PID controller using artificial neural networks // Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, 28-30 Nov. 2005. Vol. 1. -P. 702-707.
7. Захаров В.И., Ульянов С.В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. Методология проектирования // Изв. РАН. Техническая кибернетика. 1993. № 5. - С. 197-220.
8. Passino K.M., Stephen Yurkovich. Fuzzy Control. - Boston (USA): Addison Wesley Longman, 1998. - 522 p.

9. Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. № 8. - P. 338-353.
10. Hu B.G., Mann G.K.I., Gossine R.G. A systematic study of fuzzy PID controllers - functionbased evaluation approach // *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2001. Vol. 9, №5. - P. 699-711.
11. Kawafuku R., Sasaki M., Kato S. Selftuning PID control of a flexible micro actuator using neural networks // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 11-14 Oct. 1998. Vol. 3. P. 3067-3072.
12. Li Jie, Xie Jianying, Wu Zhengmao. Design of disturbance rejection PID controllers for time delay system based on genetic algorithms // *International Conference on Neural Networks and Brain (ICNN&B '05)*, 13-15 Oct. 2005. Vol. 2. - P. 876-880.
13. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. -416 с.
14. Бурлаков М.В. Нечеткие регуляторы. – СПб.: ГУАП, 2010. -252 с.
15. Лубенцова Е.В., Петраков В.А., Слюсарев Г.В., Лубенцов В.Ф. Метод построения нечетких регуляторов с использованием аналитических выражений для управляющих воздействий // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 11. Том 3. – С. 484-490.
16. Мелехин В.Б., Алиев С.Н., Вердиев М.М. Лингвистические функции и особенности их применения в системах управления и принятия решений // *Научно-технические ведомости СПб ГПУ. Основной выпуск*. 2008. №2. С. 249-254.
17. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. -272 с.
18. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование поведения интеллектуального робота. – М.: Энергоатомиздат, 1994. -238 с.
19. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б., Канаев М.М. Выбор величины управления при реализации нечетких управляющих алгоритмов// *Электронное моделирование*. 1989. № 1. -С. 91-99.
20. Драйнер М., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ / Пер. с англ. В 2-х кн. Кн. 1. –М.: Финансы и статистика, 1986. -366 с.
21. Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Советское радио, 1980. -232 с.

References:

1. Khizhnyakov Yu. N. Algoritmy nechetkogo, neironnogo i neuro-nechetkogo upravleniya v sistemakh real'nogo vremeni. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2013. 169 s. [Khizhnyakov Yu. N. Algorithms of fuzzy, neural and neural-fuzzy control in real-time systems. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2013. 169 p. (in Russ.)]
2. Pegat A. Nechetkoe modelirovanie i upravlenie. 2-e izd. Moscow: BINOM. Laboratoriya znanii; 2013. 798 s. [Pegat A. Fuzzy modeling and control. 2nd edition. Moscow: BINOM. Laboratoriya znanii; 2013. 798 p. (in Russ.)]
3. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximations. *IEEE Transactions on Computers*. 1994; 43(11):1329-1333.
4. Cordon O., Herrera F., A General study on genetic fuzzy systems. In *Genetic Algorithms in Engineering and Computer Science*. J. Periaux, G. Winter, M. Galan, and P. Cuesta (Eds.): John Wiley and Sons; 1995. P. 33-57.
5. Sivanandam S.N., Sumathi S., Deepa S.N. Introduction to fuzzy logic using Matlab. Berli: Springer; 2007. 430 p.
6. Kato M., Yamamoto T., Fujisawa S. A skill based PID controller using artificial neural networks. Proceedings of “Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce”. 2005. Vol. 1. P. 702-707.
7. Zakharov V.I. Ul'yanov S.V. Nechetkie modeli intellektual'nykh promyshlennykh regulyatorov i sistem upravleniya. Metodologiya proektirovaniya. *Izvestiya RAN. Tekhnicheskaya*

- kibernetika. 1993; 5: 197-220. [Zakharov V.I. Ul'yanov S.V. Fuzzy models of intelligent industrial controllers and control systems. Design Methodology. Journal of Computer and Systems Sciences International. 1993; 5: 197-220. (in Russ.)]
8. Passino K.M., Yurkovich S. Fuzzy Control. Boston (USA): Addison Wesley Longman; 1998. 522 p.
 9. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965; 8:338-353.
 10. Hu B.G., Mann G.K.I., Gossine R.G. A systematic study of fuzzy PID controllers - functionbased evaluation approach. IEEE Trans. Fuzzy Syst. 2001; 9(5):699-711.
 11. Kawafuku R., Sasaki M., Kato S. Selftuning PID control of a flexible micro actuator using neural networks. Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1998; 3: 3067-3072.
 12. Jie L., Jianying X., Zhengmao W. Design of disturbance rejection PID controllers for time delay system based on genetic algorithms. Proceedings of International Conference on Neural Networks and Brain (ICNN&B '05). 2005; 2:876-880.
 13. Gostev V.I. Proektirovanie nechetkikh regulyatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya. Saint-Petersburg: BHV – Peterburg; 2011. 416 s. [Gostev V.I. Designing fuzzy controllers for automatic control systems. Saint-Petersburg: BHV – Peterburg; 2011. 416 s. (in Russ.)]
 14. Burlakov M.V. Nechetkie regulatory. Saint-Petersburg: GUAP; 2010. 252 s. [Burlakov M.V. Fuzzy regulators. Saint-Petersburg: GUAP; 2010. 252 p. (in Russ.)]
 15. Lubentsova E.V., Petrakov V.A., Slyusarev G.V., Lubentsov V.F. Metod postroeniya nechetkikh regulyatorov s ispol'zovaniem analiticheskikh vyrazhenii dlya upravlyayushchikh vozdeistvii. Fundamental'nye issledovaniya. 2015; 11(3):484-490. [Lubentsova E.V., Petrakov V.A., Slyusarev G.V., Lubentsov V.F. Method for constructing fuzzy regulators using analytical expressions for control actions. Fundamental research. 2015; 11(3):484-490. (in Russ.)]
 16. Melekhin V.B., Aliev S.N., Verdiev M.M. Lingvisticheskie funktsii i osobennosti ikh primeniya v sistemakh upravleniya i prinyatiya reshenii. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPb GPU. Osnovnoi vypusk. 2008; 2:249-254. [Melekhin V.B., Aliev S.N., Verdiev M.M. Linguistic functions and features of their application in management and decision-making systems. St. Petersburg Polytechnic University Journal Of Engineering Sciences And Technology. 2008; 2:249-254. (in Russ.)]
 17. Melikhov A.N., Bernshtein L.S., Korovin S.Ya. Situatsionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoi logikoi. Moscow: Nauka; 1990. 272 s. [Melikhov A.N., Bernshtein L.S., Korovin S.Ya. Fuzzy-Logic Situational Advisory Systems. Moscow: Nauka; 1990. 272 p. (in Russ.)]
 18. Bernshtein L.S., Melekhin V.B. Planirovanie povedeniya intellektual'nogo robota. Moscow: Energoatomizdat; 1994. 238 s. [Bernshtein L.S., Melekhin V.B. Planning the behavior of an intellectual robot. Moscow: Energoatomizdat; 1994. 238 s. (in Russ.)]
 19. Bernshtein L.S., Melekhin V.B., Kanaev M.M. Vychor velichiny upravleniya pri realizatsii nechetkikh upravlyayushchikh algoritmov. Elektronnoe modelirovanie. 1989; 1:91-99. [Bernshtein L.S., Melekhin V.B., Kanaev M.M. Selection of the control value for the realization of fuzzy control algorithms. Engineering Simulation. 1989; 1:91-99. (in Russ.)]
 20. Drayner M., Smit G. Prikladnoi regressiionnyi analiz. Per. S. Angl. V 2 kn. Kn. 1. Moscow: Finansy i statistika; 1986. 366 s. [Drayner M., Smit G. Applied regression analysis. Translated from English. In 2 books. Book 1. Moscow: Finansy i statistika; 1986. 366 p. (in Russ.)]
 21. Rastrigin L.A. Sovremennye printsipy upravleniya slozhnyimi ob"ektami. Moscow: Sovetskoye radio; 1980. 232 s. [Rastrigin L.A. Modern principles of managing complex objects. Moscow: Sovetskoye radio; 1980. 232 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах.

Абдурагимов Тимур Тагирович - соискатель кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем.

Мелехин Владимир Борисович - д.т.н., профессор, зав. кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем.

Хачумов Вячеслав Михайлович - д.т.н., профессор, зав лаб. 0-4. «Методы интеллектуального управления» Института системного анализа РАН.

Information about the authors.

Timur T. Abduragimov - competitor of the pulpit of software of the computing machinery and automated systems.

Vladimir B. Melekhin - Dr. Sc. (Technical), Prof., head of the chair of software of the computing machinery and automated systems.

Vyacheslav M. Nachumov - Dr. Sc. (Technical), Prof. head of Lab. 0-4. «Methods of intellectual management», Institute of the system analysis by WOUNDS.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 12.12.2016.

Принята в печать 20.01.2017.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.12.2016.

Accepted for publication 20.01.2017.