УДК 62-58:621.3.078
DOI: 10.17223/19988605/54/3

И.А. Шмидт, В.П. Казанцев, А.В. Могильников

ПОЗИЦИОННО-ТРАЕКТОРНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

Рассмотрены вопросы построения позиционно-траекторных электромеханических систем управления, обеспечивающих формирование квазиоптимальных по быстродействию переменных движения объекта – положения, скорости и ускорения – при заведомо неизвестных по величине и времени изменения задающих воздействий. Предложен подход к синтезу системы позиционирования объекта по некоторой пространственной оси на основе применения алгоритмов нечеткого логического вывода. Приведены результаты имитационного моделирования, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: электромеханическая система управления; позиционно-траекторное управление; нечеткий регулятор; имитационное моделирование.

Позиционно-траекторные системы, как и позиционно-следающие системы управления, характеризуются тем, что задающее воздействие (задание пространственного положения объекта) заведомо не известно и определяется внешней подсистемой (окружающей средой). К таким техническим объектам относятся многочисленные роботы-манипуляторы, функционирующие в едином ограниченном рабочем пространстве с иными подвижными или неподвижными объектами и требующие оперативного изменения траектории движения, ориентируясь на системы технического зрения и некоторые приоритеты (правила) движения [1, 2]. К таким объектам относятся также автоматизированные мобильные транспортные установки, подъемно-транспортные машины, различные автоматизированные крановые установки [3], оператор которых ориентируется в процессе движения на визуальный контроль окружающей обстановки. Аналогичные принципы управления лежат также в основе адаптивных задатчиков интенсивности и эталонных моделей механического движения объектов [3, 4]. Целевая траектория движения этих объектов в общем случае неизвестна и определяется внешней средой.

Рассматриваемый класс систем управления базируется на применении электромеханических систем управления (ЭМСУ), которые призваны обеспечить оптимизацию движения рабочих органов (РО) механизмов с заданным ограничением фазовых переменных – скорости, ускорения (замедления) и в общем случае рывка (удара). Необходимость адаптации ЭМСУ к изменению внешней среды требует совершенствования алгоритмов управления, обеспечивающих, с одной стороны, максимальное быстродействие отработки любых по величине и времени изменения заданий позиции РО, с другой – отсутствие перерегулирования при подходе к установившемуся состоянию. Эти требования во многом противоречивы и требуют оптимального сочетания линейных и нелинейных, адаптивных алгоритмов управления.

Как известно [1], оптимальное по быстродействию управление является релейным, и алгоритм работы оптимального регулятора описывается выражением

$$U_m = u \cdot \text{sign} V(x_1, \dots, x_n),$$

где функция, определяющая знак управляющего воздействия $V = V(x_1, \dots, x_n)$, называется функцией переключения. Задача синтеза оптимального релейного регулятора сводится к определению аналитического выражения функции переключения, решается в режиме реального времени и не только является крайне сложной, но и ведет к образованию предельных циклов вблизи установившихся режимов, в том числе с реализацией скользких режимов, что для электромеханических систем, как правило, недопустимо.

Известны довольно эффективные адаптивные эталонные модели движения, основанные именно на сочетании различных принципов управления, включая принцип финитного управления, и реализованные в классе систем с переменной структурой с арифметико-логическими алгоритмами самонастройки [4–6]. Вместе с тем, как показывают исследования, эти модели достаточно сложны в реализации и имеют общий недостаток – сравнительно низкое качество функционирования при скачкообразных изменениях задания позиции в произвольные моменты времени, связанные, например, с экстренной необходимостью обхода или уклонения от препятствия.

В [6] рассмотрен синтез контроллеров движения для позиционно-следящих систем, основанный на методологии модельного прогнозирующего управления, который предполагает расчет прогнозного периода управления объектом на каждом шаге управления. Алгоритм расчета предусматривает решение задачи однопараметрической оптимизации для значения оптимального периода управления и, соответственно, момента времени изменения величины финитного управления. Однако при времени расчета в цикле оптимизации, меньшем 0,001 с, трудоемкость такого расчета может стать препятствием для практического применения предлагаемого подхода в реальном масштабе времени.

Цель исследования – разработка достаточно простых в реализации регуляторов позиционно-траекторных ЭМСУ на основе алгоритмов нечеткого логического вывода, обеспечивающих близкое к оптимальному (квазиоптимальное) по быстродействию формирование заведомо неизвестной целевой траектории движения РО при заданных ограничениях фазовых переменных.

1. Описание модели объекта позиционного управления и определение ее переменных

Ниже рассмотрен подход к синтезу позиционно-траекторных ЭМСУ на основе теории нечетких систем управления. Как показано в дальнейшем, отказаться от решения строгой оптимизационной задачи предельного быстродействия и, следовательно, избежать вычислительных сложностей можно, реализовав регулятор контроллера движения на основе алгоритмов нечеткого логического вывода, основные идеи которого были изложены в [7]. Нечеткие логические регуляторы (НЛР) в настоящее время достаточно широко распространены, причем наиболее очевидны их преимущества для систем с неполной информацией и высокой сложностью объекта управления [8, 9]. Однако и для ЭМСУ, описываемых простыми линейными моделями, но функционирующими в условиях изменчивости окружающей среды, такой подход вполне оправдан.

Пусть объект позиционного управления описывается моделью интегратора 2-го порядка:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t),$$

где $X(t)$ – вектор состояния, $X = [x, v]^T$, x – положение, v – скорость; $U(t)$ – скалярное дискретное управление (ускорение), $U(t) = a$; A, B – матрицы постоянных коэффициентов размера $2 \times 2, 2 \times 1$ соответственно.

Ограничения на компоненты вектора состояния будут рассмотрены позднее.

Для определенности зададим матрицы коэффициентов в форме Фробениуса:

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Нечеткий регулятор будет иметь две входных переменных (ошибка положения и скорость) и одну выходную (ускорение).

2. Составление терм-множеств

Для входной переменной «ОшибкаПоложения» определим два нечетких терм-множества: «ОшибкаПоложительна» и «ОшибкаОтрицательна». Принадлежность к этим множествам дает вклад в выход регулятора, эквивалентный пропорциональной составляющей традиционного регулятора. Для скорости определим следующие нечеткие множества: «СкоростьПоложительна», «СкоростьОтрицательна», «СкоростьВблизиНуляПоложительна», «СкоростьВблизиНуляОтрицательна».

Для выходной переменной регулятора определим два множества: «УскорениеПоложительно» и «УскорениеОтрицательно». Границы функций принадлежности для этих множеств задают ограничение управления $|a| \leq a_{\max}$. В дальнейшем для определенности примем $a_{\max} = 2 \text{ м/с}^2$.

Логика работы регулятора следующая: при возникновении ошибки положения выходная переменная сначала будет формироваться за счет попадания ошибки в терм-множества «ОшибкаПоложительна» или «ОшибкаОтрицательна» (дальнейшее рассмотрение будем проводить для случая отклонения в положительную сторону, для отклонения в отрицательную сторону все рассуждения будут симметричными). При уменьшении ошибки скорость будет возрастать до тех пор, пока не попадет в множество «СкоростьПоложительно», после чего скорость должна уменьшаться, т.е. формироваться за счет множества «УскорениеОтрицательно». Одновременное достижение нулевого отклонения и нулевой скорости (достижение цели регулирования) возможно только при идеальных условиях – отсутствии внешних воздействий и отсутствии ошибок измерения или вычисления. Для неидеальных условий требуется дополнительно добиться достижения нулевой скорости. Эта дополнительная доводка скорости осуществляется за счет принадлежности скорости множеству «СкоростьВблизиНуляПоложительно» при условии, что «ОшибкаПоложения» не принадлежит множеству «ОшибкаПоложительна». Таким образом, мы можем сформировать базу правил системы нечеткого вывода (приводится только для случая отклонения ошибки в положительную сторону):

1. IF ОшибкаПоложения IS ОшибкаПоложительна AND Скорость IS NOT СкоростьПлюс THEN Ускорение IS УскорениеПоложительно.
2. IF Скорость IS СкоростьПлюс THEN Ускорение IS УскорениеОтрицательно.
3. IF Скорость IS СкоростьВблизиНуляПоложительно AND ОшибкаПоложения IS NOT ОшибкаПоложительна THEN Ускорение IS УскорениеОтрицательно.

3. Определение параметров функций принадлежности

Остановимся на определении параметров функций принадлежности для каждого терм-множества. Функции принадлежности определяют степень принадлежности каждого элемента нечеткому множеству числом между 0 и 1, которое определяет степень истинности входного или выходного сигнала данному терму [10]. Для терм-множеств входных переменных будем использовать трапецевидные или треугольные функции принадлежности. На данный момент не существует общего формального правила нахождения параметров функций принадлежности, их настройка носит преимущественно эвристический характер [11, 12].

Функция принадлежности множества «ОшибкаПоложительна» определена так:

$$\mu_{\text{ОшибкаПоложительна}}(x) = \begin{cases} 0, & x \in (-\infty, 0), \\ 1, & x \in [0, \infty), \end{cases}$$

т.е. функция принадлежности имеет ступенчатую форму. Интервал от $-0,1$ до $0,1$ – это зона нечувствительности регулятора по ошибке.

Для терм-множества «СкоростьПлюс» имеем

$$\mu_{\text{СкоростьПлюс}}(v) = \begin{cases} 0, & v \in (-\infty, v_{\text{гран}}), \\ (v - v_{\text{гран}}) / 0,01, & v \in [v_{\text{гран}}, v_{\text{гран}} + 0,01), \\ 1, & v \in [v_{\text{гран}} + 0,01, \infty). \end{cases}$$

Здесь $v_{\text{гран}}$ – это граница скорости, являющаяся функцией ошибки, т.е. значение скорости, при котором в случае воздействия минимального значения ускорения $-a_{\max}$ ошибка успеет уменьшиться до нуля, а сама скорость при этом также уменьшится до нуля. Таким образом, граница скорости будет равна

$$v_{\text{гран}} = \sqrt{2B_2 a_{\max} x},$$

где B_2 – параметр, связывающий управление и ускорение и имеющий размерность, определяемую размерностями этих переменных. По умолчанию с целью абстрагирования от значения потребной

динамической мощности управления параметр B_2 принят равным единице. Это означает, что управление фактически реализуется ускорением.

Эта граница должна пересчитываться на каждом шаге управления, т.е. в регуляторе функция принадлежности терм-множества «СкоростьПлюс» будет зависеть от текущего значения ошибки по координате.

Терм-множество «СкоростьВблизиНуляПоложительна» определено следующим образом:

$$\mu_{\text{СкоростьВблизиНуляПоложительна}}(v) = \begin{cases} 0, & v \in (-\infty, 0,01), \\ (v - 0,01) / (10,01 - 0,01), & v \in [0,01, 10,01], \\ 0, & v \in (10,01, \infty). \end{cases}$$

Для выходной переменной (ускорения) определяются два нечетких множества, функции принадлежности которых имеют треугольную форму и описываются так:

$$\mu_{\text{УскорениеОтрицательно}}(a) = \begin{cases} 0, & a \in (-\infty, 2), \\ |(a - 2) / 4|, & a \in [-2, 2], \\ 0, & a \in (2, \infty), \end{cases}$$

$$\mu_{\text{УскорениеПоложительно}}(a) = \begin{cases} 0, & a \in (-\infty, 2), \\ (a + 2) / 4, & a \in [-2, 2], \\ 0, & a \in (2, \infty). \end{cases}$$

4. Результаты имитационного моделирования

Для проверки описанного НЛР была разработана программа в среде LabView [13], что позволяет использовать ее непосредственно в составе контроллера движения. Шаг управления выбран 0,001 с. На рис. 1 слева показаны переходные процессы при изменении задания положения от 0 до 5 м. Здесь и далее принято, что положение, скорость и ускорение имеют соответственно размерности м, м/с, м/с², по оси абсцисс – время, с.

Чтобы добавить ограничение по скорости достаточно определить дополнительное терм-множество «ОграничениеСкоростиПлюс». Представим функцию принадлежности при условии, что ограничение по скорости принято 2м/с:

$$\mu_{\text{ОграничениеСкоростиПлюс}}(v) = \begin{cases} 0, & v \in (-\infty, 2), \\ 1, & v \in [2, \infty). \end{cases}$$

В первое правило базы правил нечеткого вывода необходимо добавить условие непопадания в множество «ОграничениеСкоростиПлюс»:

1. IF ОшибкаПоложения IS ОшибкаПоложительна AND Скорость IS NOT СкоростьПлюс AND Скорость IS NOT ОграничениеСкоростиПлюс THEN Ускорение IS УскорениеПоложительно.

Переходные процессы с добавленным ограничением по скорости представлены на рис. 1 справа.

Моделирование подтвердило, что правила нечеткого вывода обеспечивают близкое к оптимальному по быстродействию управление объектом управления, при этом сами правила сформулированы из требований оптимального по быстродействию регулирования, т.е. в первый период переходного процесса при возникновении ошибки положения на объект управления будет воздействовать максимально возможное ускорение. Этот интервал будет длиться до тех пор, пока скорость не достигнет предельно допустимого значения. Во время второго интервала регулирования объект перемещается с предельно допустимой скоростью, пока рассчитанная граница скорости $v_{\text{гран}}$, являющаяся функцией ошибки положения, не станет равной текущему значению скорости. Во время третьего интервала на объект управления воздействует максимальное ускорение с обратным знаком (объект тор-

мозится). Такое поведение практически совпадает с поведением аналогичного объекта [4–6], где регулирование осуществляется на основе финитного управления. Таким образом, мы видим, что нечеткий регулятор обеспечивает приближенное к оптимальному (квазиоптимальное) по быстродействию поведение системы.

Рис. 1. Процессы в ЭМСУ при изменении задания положения без ограничения скорости (слева) и с ограничением скорости (справа)

Fig. 1. Processes in EMCS when changing the position setting without speed limit (left) and with speed limit (right)

Для демонстрации процессов с изменением задания положения во время переходного процесса, связанного, например, с экстренной необходимостью коррекции траектории движения, задание положения было изменено с 4 до -4 м. На рис. 2 видно, что регулятор отработал и эту ситуацию успешно для произвольных по величине и времени изменений задающих воздействий.

Рис. 2. Процессы в ЭМСУ при изменении задания положения с коррекцией траектории движения в переходном процессе

Fig. 2. Processes in EMCS when changing the position setting with correction of the trajectory in the transition process

Ниже продемонстрировано, что регулятор может работать в случае, когда на систему действует внешнее возмущение. В показанном примере на объект управления действует постоянное возмущение с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$. Пока задание на изменение положения равно нулю, регулятор периодически выдает импульсы ускорения для компенсации возмущения.

На рис. 3 представлены два процесса: при выдаче задания на увеличение положения (от 0 до 5 м) и на его уменьшение (от 0 до -5 м). В обоих случаях регулятор обеспечивает квазиоптимальные по быстродействию процессы.

Рис. 3. Процессы в ЭМСУ при воздействии внешнего возмущения на входе объекта управления, равного $0,2 \text{ м/с}^2$
 Fig. 3. Processes in EMCS under the influence of an external disturbance at the input of the control object equal to $0,2 \text{ м/с}^2$

Рис. 4. Процессы в ЭМСУ при изменении задания положения для коэффициента $B_2 = 0,5$
 Fig. 4. Processes in EMCS when changing the position setting for the coefficient $B_2 = 0,5$

Нечеткий логический регулятор обеспечивает работоспособность ЭМСУ при изменении параметров объекта без дополнительной подстройки, т.е. система демонстрирует свойства параметрической адаптивности. На рис. 4 показана работа системы при $B_2 = 0,5$, что соответствует ступенчатому увеличению массы (момента инерции) объекта в два раза, изменение этого коэффициента учтено при расчете границы скорости $v_{\text{гран}}$. Сравнивая процесс с рис. 1 (справа) можно заметить, что период воздействия ускорения длится дольше, а период работы при ограничении скорости – меньше. При этом

отработка перемещения осуществляется также практически оптимально по критерию быстродействия без перерегулирования при подходе к заданной позиции.

Заключение

Приведенные в статье результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

- в отличие от известных решений оптимального по быстродействию управления предложенный подход базируется на применении алгоритмов нечеткого логического вывода и не требует программно-временного задания времени существования максимально допустимых уровней фазовых переменных (скорости, ускорения / замедления) и задания моментов времени изменения задающего воздействия;
- ЭМСУ с предложенным алгоритмом логического вывода демонстрирует свойства астатического регулирования при внешних аддитивных возмущениях на входе объекта управления;
- показано, что нечеткий логический регулятор обеспечивает работоспособность ЭМСУ при изменении параметров объекта без дополнительной подстройки, т.е. система демонстрирует свойства параметрической самонастройки;
- предложенный нечеткий регулятор обеспечивает заданное ограничение фазовых переменных механического движения и может использоваться для построения адаптивной к внешним условиям эталонной модели, включаемой в структуру адаптивных ЭМСУ в качестве предшествующего фильтра либо в качестве эталонной динамической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пшихопов В.Х. Оптимальное по быстродействию траекторное управление электромеханическими манипуляционными роботами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2007. № 1. С. 51–57.
2. Гусев Н.В., Букреев В.Г. Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами : учеб. пособие. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2007. 213 с.
3. Виноградов А.Б., Сибирцев А.Н., Журавлёв С.В. Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов // Силовая электроника. 2007. № 1. С. 78–87.
4. Казанцев В.П., Даденков Д.А., Юдин Р.Ю. Формирование эталонного движения электромеханических систем управления // Электротехника. 2019. № 11. С. 28–33.
5. Казанцев В.П., Даденков Д.А. Позиционно-следящие электроприводы с финитным управлением // Электротехника. 2015. № 6. С. 45–50.
6. Казанцев В.П., Бочкарев С.В. Финитное управление приводами установок для ультраструйной обработки и диагностики материалов // Известия вузов. Машиностроение. 2019. № 2 (707). С. 24–33.
7. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений : сб. пер. / под ред. И.Ф. Шахнова. М. : Мир, 1976. С. 172–215.
8. Асаи К., Ватага Д., Иваи С. Прикладные нечеткие системы : перевод с япон. / под ред. Т. Тэрано. М. : Мир. 1993. 344 с.
9. Соловьев В.В., Финаев В.И. Постановка задачи синтеза управления сложной системой в условиях априорной неопределенности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 5 (94). С. 59–65.
10. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев : Радиоаматор, 2008. 971 с.
11. Анисимов Д.Н., Новиков В.Н., Сафина Э.А. Исследование влияния треугольных норм на динамику нечеткой системы автоматического управления // Вестник московского энергетического института (МЭИ). 2013. № 4. С. 186–192.
12. Соловьев В.В., Финаев В.А. Синтез систем адаптивного управления для многосвязных объектов с нечеткими параметрами // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2012. № 1 (45). С. 117–125.
13. LabVIEW : PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual. Austin, TX : National Instruments Corporate Headquarters, 2009. 213 p.

Поступила в редакцию 18 июня 2020 г.

Shmidt I.A., Kazantsev V.P., Mogilnikov A.V. (2021) POSITIONAL-TRAJECTORY ELECTROMECHANICAL CONTROL SYSTEMS BASED ON FUZZY LOGICAL OUTPUT ALGORITHMS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 543. pp. 20–27

DOI: 10.17223/19988605/54/3

The issues of constructing positional-trajectory electromechanical control systems, ensuring the formation of quasi-optimal motion of the object variables - position, speed and acceleration - at unknown in size and time changes of the set effects are considered.

It is assumed that specific limits are imposed on the values of speed and acceleration due to the combination of technological, energy, ergonomic and other requirements. An approach to the synthesis of the object positioning system on a certain spatial axis based on the application of fuzzy logical output algorithms, which have found wide application for systems with high complexity and structural and parametric uncertainty of the control object model, has been proposed. It is shown that for electromechanical control systems of low complexity, but with incomplete information about the external environment, this approach allows you to get simple, but quite effective control algorithms. The fuzzy regulator has two input variables (position error and speed) and one output (acceleration). Six fuzzy sets have been defined for the input variables, and two sets for the output variable. Belonging to these sets allowed to get a fuzzy-logical regulator, equivalent in structure to the proportional regulator, but providing self-tuning to the notoriously unknown parameters of the positioning of the object. The proposed approach can be used in the construction of positional-trajectory control systems, the formation of S-ramp to limit phase variable electric drives or when building reference models for adaptive control systems. The results of the simulation, confirming the effectiveness of the proposed approach, are presented.

Keywords: electromechanical control system; positional-trajectory control; fuzzy regulator; simulation modeling.

SHMIDT Igor Albertovich (Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Microprocessors Automation Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation).

E-mail: shmidt-ia@yandex.ru, shmidt@msa.pstu.ac.ru

KAZANTSEV Vladimir Petrovich (Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Microprocessors Automation Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation).

E-mail: kvppgtu2012@yandex.ru, kvppgtu@mail.ru

MOGILNIKOV Andrey Vyacheslavovich (Student of the Microprocessors Automation Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation).

E-mail: mogilnikov.andrej@mail.ru

REFERENCES

1. Pshikhopov, V.Kh. (2007) Optimal'noe po bystrodeystviyu traektornoe upravlenie elektromekhanicheskimi manipulyatsionnymi robotami [Optimum performance electromechanical management path manipulation robots]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*. 1. pp. 51–57.
2. Gusev, N.V. & Bukreev, V.G. (2007) *Sistemy tsifrovogo upravleniya mnogokoordinatnymi sledyashchimi elektroprivodami* [Digital control systems for multi-coordinate servo drives]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University.
3. Vinogradov, A.B., Sibirtsev, A.N. & Zhuravlev, S.V. (2007) Bezdatchikovyy elektroprivod pod'emno-transportnykh mekhanizmov [Sensorless electric hoisting-and-transport mechanisms]. *Silovaya elektronika*. 1. pp. 78–84.
4. Kazantsev, V.P., Dadenkov, D.A. & Yudin, R.Yu. (2019) A reference model for the motion of electromechanical control systems. *Russian Electrical Engineering*. 90(11). pp. 729–733. DOI: 10.3103/S1068371219110051
5. Kazantsev, V.P. & Dadenkov, D.A. (2015) Position-servo drives with finite control. *Russian Electrical Engineering*. 6. pp. 45–50. DOI: 10.3103/S106837121506005X
6. Kazantsev, V.P. & Bochkarev, S.V. (2019) Finite Control of Actuators of Machines for Ultra-Jet Processing and Diagnostics of Materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Mashinostroyeniye – BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2(707). pp. 24–33. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-2-24-33
7. Bellman, R.E. & Zadeh, L.A. (1970) Prinyatie resheniy v rasplyvchatykh usloviyakh [Decision-making in fuzzy environment]. In: Shakhnov, I.F. (ed.) *Voprosy analiza i protsedury prinyatiya resheniy* [Analysis Issues and Decision-Making Procedures]. Moscow: Mir. pp. 141–160.
8. Asai, K., Wataga, D. & Iwai, S. (1993) *Prikladnye nechetkie sistemy* [Applied Fuzzy Systems]. Translated from Japanese. Moscow: Mir.
9. Soloviev, V.V. & Finaev, V.I. (2009) Postanovka zadachi sinteza upravleniya slozhnoy sistemoy v usloviyakh apriornoy neopredelennosti [Statement of the problem of synthesis of control of a complex system in conditions of a priori uncertainty]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*. 5(94). pp. 59–65.
10. Gostev, V.I. (2008) *Nechetkie regulatory v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya* [Fuzzy Controllers in Automatic Control Systems]. Kyiv: Radioamator.
11. Anisimov, D.N., Novikov, V.N. & Safina, E.A. (2013) Issledovanie vliyaniya treugol'nykh norm na dinamiku nechetkoy sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Investigation of the influence of triangular norms on the dynamics of a fuzzy automatic control system]. *Vestnik moskovskogo energeticheskogo instituta (MEI) – Bulletin of MPEI*. 4. pp. 186–192.
12. Soloviev, V.V. & Finaev, V.A. (2012) Sintez sistem adaptivnogo upravleniya dlya mnogosvyaznykh ob"ektov s nechetkimi parametrami [Synthesis of adaptive control systems for multi-connected objects with fuzzy parameters]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya – Rostov State Transport University*. 1(45). pp. 117–125.
13. National Instruments Corporate Headquarters. (2009) *LabVIEW PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual*. (June 2009). Austin, TX: National Instruments Corporate Headquarters.