

УДК 681.518

АЛГОРИТМЫ ПОДАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗОВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

О.А. ШВЕДОВА, А.С. ШМАРЛОВСКИЙ, А.В. МАРКОВ, Т.В. ТАРАСЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 14 января 2014

Приведены результаты разработки и исследования алгоритмов подавления колебаний с нечеткой логикой функционирования для перемещения грузов с помощью подъемно-транспортных механизмов. Произведен анализ эффективности управления с нечеткой логикой функционирования, исследовалась чувствительность системы управления к изменениям длины подвеса.

Ключевые слова: подъемно-транспортные механизмы, подавление колебаний, управление с нечеткой логикой функционирования.

Введение

Перемещение подвешенного полезного груза приводит к его раскачиванию. Возникающие колебания передаются на конструкцию подъемно-транспортного механизма (ПТМ) и в случае нежесткой конструкции могут приводить к раскачиванию всего механизма. Многие технологические процессы накладывают ограничения на амплитуду возникающих колебаний, что вынуждает снижать скорость транспортировки грузов. Длительность процесса позиционирования также значительно увеличивается из-за необходимости успокоения груза. Все это приводит к снижению производительности. В настоящее время управление процессом перемещения грузов с подавлением возникающих колебаний во многих ПТМ не автоматизировано, а для качественного выполнения некоторых технологических операций оператор должен обучаться не менее двух лет.

Как показывает анализ публикаций по данному вопросу, в настоящее время для управления процессом перемещения грузов в условиях отсутствия информации обратной связи о характере колебаний наибольшее распространение получили input-shaping-алгоритмы. Однако эти алгоритмы имеют хорошие показатели только при использовании линейных объектов управления. Учет существующих ограничений по управляющим воздействиям, создаваемым приводами ПТМ, приводит к необходимости использования специальных мер, значительно ухудшающих быстродействие выполнения технологических операций при использовании данных алгоритмов управления. Для управления ПТМ с использованием сигнала обратной связи наиболее часто применяются системы управления с нечеткой логикой функционирования. Однако качество управления в таких системах определяется используемой базой знаний (обучением) и точностью настройки функций принадлежности. Это приводит к необходимости трудоемкой ручной настройки параметров системы управления, как на этапе ее проектирования, так и во время пуско-наладочных работ. В итоге такие системы могут быть реализованы только для применения в рамках конкретного технологического процесса.

Разработка эффективных алгоритмов управления, обладающих гибкостью и характеризующихся простотой практического применения и реализации, является актуальной задачей.

Теоретический анализ

Предложены различные способы использования регуляторов с нечеткой логикой функционирования (НЛФ) в структуре системы управления. В [1] применили аппарат нечеткой логики как к устройству позиционного управления, так и к устройству демпфирования колебаний. В [2] предложили управление с обратной связью на основе нечеткой логики, в [3] была разработана система управления мостовым краном на базе нечеткой логики с реализацией концепции плавного управления. В [4] была предложена интеллектуальная система управления порталным краном, в которой на базе нечеткой логики (нечетких контроллеров) реализованы два регулятора: регулятор положения и регулятор подавления колебаний. Работа предложенной системы управления порталного крана была оценена экспериментально на порталном кране масштаба лаборатории. Было показано, что предложенная система характеризуется как хорошим позиционированием, так и хорошей способностью подавлять колебания по сравнению с подъемным краном, которым управляют ПИД-регуляторы. Предложены также схемы, в которых нечеткие контроллеры объединяются со стандартными. Например, в работе [5] используется схема, в которой регулятор с НЛФ объединяется с ПИ-регулятором. При этом нечеткий контроллер, обеспечивающий демпфирование колебаний, включается только на этапе позиционирования. Такая схема не позволяет подавлять колебания, возникающие во время передвижения. Как отмечается в [5], реализовать схему с совместной работой стандартных и нечетких контроллеров сложно ввиду того, что алгоритм подавления колебаний входит в противоречие с алгоритмом позиционирования.

Разделение задачи управления на подавление колебаний и управление положением позволяет производить раздельную настройку регуляторов в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями. Для обеспечения возможности работы ПТМ с различными длинами подвеса в структуре регулятора подавления колебаний обычно используется параметр, характеризующий длину. При синтезе регулятора положения чаще всего отказываются от учета изменения массы груза (считают, что массы перемещаемых грузов одинаковые или их вариацией можно пренебречь).

Методика эксперимента

Структурная схема системы управления с НЛФ [6] представлена на рис. 1. Процедура формирования алгоритма управления выполняется в три этапа. На первом этапе блок фаззификации (*Ff*) преобразует входные физические переменные (x_1, x_2, \dots, x_n) в термы A_i лингвистических переменных и выделяет для каждого временного такта значения функций принадлежности $\mu_i(x)$ для активизированных правил [7]. Блок логического заключения (*Inf*) в соответствии с правилами, заложенными в блок базы правил (*RAM*), определяет термы B_j выходной лингвистической переменной и присваивает им значения функций принадлежности $\mu_j(y)$. Процедура преобразования нечеткого множества (термы B_j) в четкое значение физической переменной y (управляющий сигнал) выполняется блоком дефаззификации (*Dff*).

Большинство реализованных на практике способов управления на базе нечетких контроллеров осуществляют подавление колебаний с использованием сигналов угла отклонения груза и его производной. При этом эти сигналы для сохранения показателей качества управления на приемлемом уровне должны быть незашумленными. В основу синтеза СУ положено управление на фазовой плоскости в координатах угла отклонения груза и его производной. При этом по сути реализуется ПД-управление с нелинейными характеристиками. В основу базы правил (логический закон, по которому синтезируется демпфирующий нечеткий контроллер) закладываются правила, основанные на реализации следующих принципов [5,6]:

– если знаки угла отклонения груза и скорости отклонения угла одинаковы, то груз удаляется от положения равновесия, и требуется дать управляющее воздействие того же знака (т. е. переместить механизм в направлении отклонения груза);

– если знаки угла отклонения груза и его скорости противоположны, то требуется дать нулевое или небольшое управляющее воздействие, уменьшающее отклонение;

– если угол отклонения груза и его скорость равны нулю, то груз находится в положении равновесия, и управляющего воздействия не требуется.

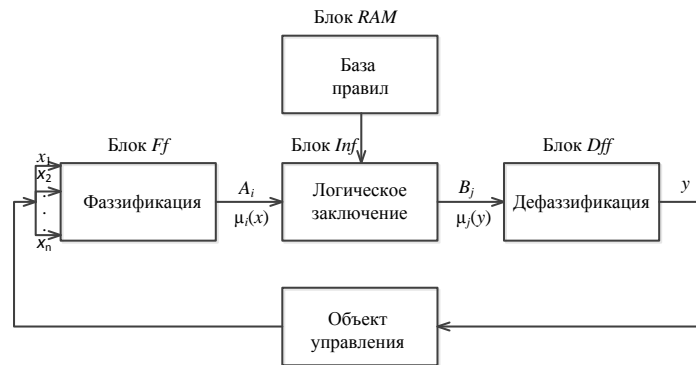


Рис.1. Структурная схема системы управления с нечеткой логикой функционирования

Для реализации управления с нечеткой логикой ПТМ оказывается достаточным использование 3-х или 5-ти нечетких множеств для входных и выходных переменных [4, 8]. В некоторых случаях для выходных переменных используют 7 нечетких множеств [5, 6]. Проведенные исследования [9] позволяют сделать вывод, что при использовании треугольных или трапециевидных функций принадлежности требуется вводить большее количество нечетких множеств (5 или 7), а при использовании гауссовых функций принадлежности достаточно 3-х нечетких множеств для каждой переменной. Применение гауссовых функций принадлежности иногда невозможно из-за ограничений аппаратной части (многие промышленные контроллеры их не поддерживают), поэтому в некоторых случаях на практике приходится использовать функции принадлежности треугольной формы и вводить большее количество нечетких множеств.

В большинстве реализаций системы с НЛФ для управления ПТМ [5, 6, 8] для составления базы правил используют таблицу правил, которая для случая 5-ти нечетких множеств для входных переменных ($A_i = \{NB \ NM \ Z \ PM \ PB\}$) и 7-ми нечетких множеств для выходных ($B_j = \{NB \ NM \ NS \ Z \ PS \ PM \ PB\}$), где все термы расположены в порядке увеличения амплитуды управляющего сигнала с учетом знака (терм NB соответствует максимально допустимому отрицательному управляющему воздействию, а терм PB – максимально допустимому положительному управляющему воздействию), имеет вид, представленный на рис. 2. Данная таблица используется для составления правил, применяемых на этапе логического заключения (блок *Inf*). Для рассматриваемого случая (рис. 2) база правил будет состоять из 25 правил, записанных в форме «ЕСЛИ ϕ есть $A_{1,i1}$ И ϕ есть $A_{2,i2}$, ТО y есть B_j » (первый индекс терма A означает номер входной переменной, а второй – номер терма). Например, для ситуации, когда значение входной переменной ϕ принадлежит нечеткому множеству $A_{1,2} = NM$ (второй столбец в таблице правил на рис. 2), а значение входной переменной ϕ принадлежит нечеткому множеству $A_{2,4} = PM$ (четвертая строка в таблице правил), значение выходной переменной y будет принадлежать нечеткому множеству $B_4 = Z$ (определяется термом, расположенным на пересечении второго столбца и четвертой строки таблицы правил). При этом термы B_j могут быть расположены в таблице правил в обратном порядке – расположение определяется способом подключения нечеткого контроллера [5, 6, 8].

Наибольшее распространение для организации нечеткого логического вывода при реализации управления с нечеткой логикой получили алгоритмы Мамдани и Такаги-Сугено [10]. Для управления ПТМ обычно применяют логический вывод с помощью метода, определяющего центр тяжести, с использованием \min/\max -регулятора Мамдани [4, 5, 6].

Экспериментальная часть

Для исследования системы управления с НЛФ в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 1, был разработан нечеткий контроллер [9, 11] с двумя входными переменными $x_1 = \phi$ и $x_2 = \dot{\phi}$ и одной выходной – $y = u$, где u – задающее воздействие электропривода (управление скоростью тележки или моста). Для определения входных переменных в блоке фаззификации (*Ff*) используется по три фаззи-множества для каждой переменной $A_1 = \{N_\phi \ Z_\phi \ P_\phi\}$, $A_2 = \{N_{\dot{\phi}} \ Z_{\dot{\phi}} \ P_{\dot{\phi}}\}$. В блоке дефаззификации (*Dff*) также используется

три нечетких множества $B = \{N_u, Z_u, P_u\}$. Для фаззификации и дефаззификации в разработанном нечетком контроллере используются гауссовы функции принадлежности:

$$\mu_k(z) = e^{-\frac{(z-c_k)^2}{2\sigma_k^2}}, \quad (1)$$

где z – входная или выходная переменная; c_k – координата максимума k -й функции принадлежности по оси z ; σ_k – коэффициент концентрации k -й функции принадлежности.

Координаты c_k располагаются равномерно в диапазоне значений физической переменной z . Для случая $k = \overline{1,3}$: $c_1 = z_{\min}$, $c_2 = 0$, $c_3 = z_{\max}$, где $z_{\min} = -z_{\max}$. Коэффициенты концентрации σ_k выбраны таким образом, чтобы

$$\mu_k\left(\frac{c_k + c_{k+1}}{2}\right) = \frac{1}{2}. \quad (2)$$

Из выражения (2) с учетом (1) и выбранного расположения координат c_k получаем

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{c_{k+1} - c_k}{8 \ln 2}}. \quad (3)$$

Конкретные значения φ_{\min} и φ_{\max} определяются требованиями к максимально допустимой величине отклонения груза. Значения $\dot{\varphi}_{\min}$ и $\dot{\varphi}_{\max}$ выбраны в несколько раз большими по отношению к φ_{\min} и φ_{\max} . Значения u_{\min} и u_{\max} выбираются в соответствии с существующими ограничениями по задающему воздействию электропривода тележки (моста). Правила составляются в соответствии с таблицей, представленной на рис. 2 (с учетом выбранного количества нечетких множеств).

	NB	NM	Z	PM	PB	$\rightarrow \varphi$
NB	NB	NB	NM	NS	Z	
NM	NB	NM	NS	Z	PS	
Z	NM	NS	Z	PS	PM	
PM	NS	Z	PS	PM	PB	
PB	Z	PS	PM	PB	PB	

Рис. 2. Таблица правил, где φ – угол отклонения груза; $\dot{\varphi}$ – скорость изменения угла отклонения груза

Графическое представление нечеткого логического вывода с учетом настроенных в соответствии с описанными выше соображениями блоков фаззификации, базы правил и дефаззификации для состояния $\varphi = -0,2$ о.е., $\dot{\varphi} = 0,6$ о.е. приведено на рис. 3. За одну относительную единицу (1 о.е.) принято максимальное значение φ_{\max} , $\dot{\varphi}_{\max}$ или u_{\max} соответственно. Поскольку в рассматриваемом случае для фаззификации используется по три фаззи-множества для каждой входной переменной, блок RAM будет иметь 9 правил (каждому правилу соответствует строка от 1 до 9 на рис. 3). Первые два столбца на рис. 3 отображают функции принадлежности термов посылок правил (ЕСЛИ – часть правила), а последний столбец отображает функции принадлежности термов следствия выходной переменной (ТО – часть правила). Закрашенная часть функций принадлежности соответствует значениям $\mu_i(x)$ или $\mu(y)$ для текущих значений переменных φ , $\dot{\varphi}$ и u . Результат выполнения нечеткого логического вывода (получение заключения в виде нечеткого множества, соответствующего текущим значениям входов, с использованием базы правил и нечетких операций) представлен в последнем столбце: выходным термам присваиваются значения функций принадлежности входных переменных с общим условием $\mu(y) \leq \mu_i(x)$, т.е. согласно принципу минимума (оператор конъюнкции) [6] $\mu(y) = \min(\mu_{k1}(\varphi), \mu_{k2}(\dot{\varphi}))$, где $k1$ и $k2$ – номера соответствующих функций принадлежности. Результирующее нечеткое множество, соответствующее логическому выводу по всем правилам показано в нижнем прямоугольнике последнего столбца – объединение происходит по принципу максимума (оператор дизъюнкции). В этом

прямоугольнике вертикальная линия соответствует четкому значению логического вывода, полученному в результате дефаззификации (значение переменной u определяется как абсцисса центра тяжести плоской фигуры, ограниченной выбранным диапазоном изменения значений переменной u и графиком функции принадлежности нечеткого множества).

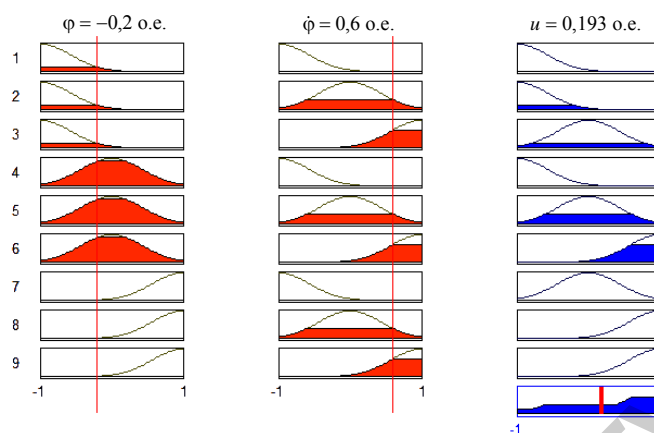


Рис. 3. Графическое представление нечеткого логического вывода

Характеристика разработанного нечеткого контроллера, описывающая изменение управляющего воздействия в зависимости от текущих угла отклонения груза и его производной, приобретает вид, представленный на рис. 4. Для анализа эффективности системы управления с НЛФ исследовалась чувствительность системы управления к изменениям длины подвеса (в большинстве случаев невозможно точно определить реальную длину подвеса – проблема информационной неопределенности). Для этого была проведена серия экспериментов, в каждом из которых изменялась длина подвеса груза в большую или меньшую сторону относительно значения, используемого при настройке нечеткого контроллера.

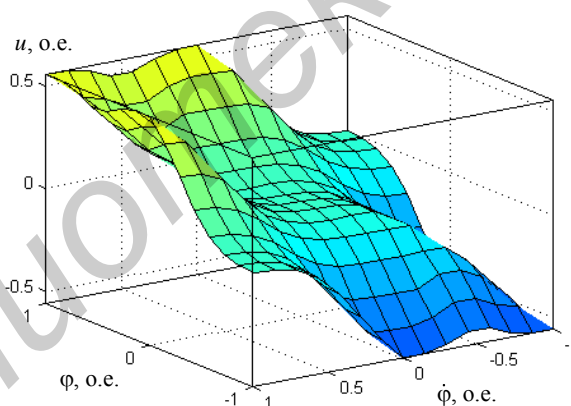


Рис. 4. Поверхности нечеткого вывода с тремя нечеткими множествами для каждой переменной

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования представлены на рис. 5 (в относительных единицах – о.е.), где l – реальное значение длины подвеса груза, $l = 1$ о.е. соответствует длине подвеса, используемой при настройке нечеткого контроллера; V – относительная амплитуда остаточных колебаний груза (отношение амплитуды остаточных колебаний груза при использовании нечеткого контроллера к амплитуде остаточных колебаний груза при отключенном нечетком контроллере), $V = 100\%$ показывает, что амплитуда остаточных колебаний в обоих случаях одинакова; $t_{\text{ин}}$ – длительность переходного процесса, $t_{\text{ин}} = 1$ о.е. соответствует периоду недемпфированных колебаний груза $T_0 = 2\pi\sqrt{l_0/g}$, где l_0 – длина подвеса груза, используемая при настройке нечеткого контроллера; g – ускорение свободного падения.

Из приведенных характеристик видно, что нечеткий контроллер значительно уменьшает амплитуду остаточных колебаний (более чем на два порядка) в широком диапазоне

изменения длины подвеса груза. Резкое увеличение амплитуды остаточных колебаний наблюдается лишь при уменьшении длины подвеса в три и более раз (рис. 5, а). Длительность переходного процесса остается стабильной при изменении l от 0,3 до 3,4 о.е. (в этом диапазоне $t_{\text{пт}}$ уменьшается от 1,57 до 1,52 о.е.) и резко увеличивается при $l > 3,4$ о.е., что объясняется более поздним наступлением момента времени, после которого имеет место неравенство $|y(t) - y(\infty)| \leq \Delta y(\infty)$, где y – выходная переменная, t – время, $y(\infty)$ – установившееся значение, $\Delta y(\infty)$ – допустимая ошибка (в данном случае 10 %). На выходе системы управления возникает затухающий колебательный переходной процесс. При этом с увеличением длины подвеса груза увеличивается колебательность системы, что приводит к тому, что с некоторого значения l выходная переменная y входит в пределы зоны $y(\infty) \pm \Delta y(\infty)$ только при изменении знака \dot{y} (например, если до этого длительность переходного процесса фиксировалась по вхождению в обозначенную зону снизу ($y(t) = y(\infty) - \Delta y(\infty)$, момент времени t_1), то с некоторого значения l переменная y (после момента времени t_1) начинает превышать значение $y(\infty) + \Delta y(\infty)$, и, следовательно, длительность переходного процесса уже фиксируется по вхождению в зону $y(\infty) \pm \Delta y(\infty)$ сверху ($y(t) = y(\infty) + \Delta y(\infty)$ момент времени t_2 , $t_2 > t_1$), что и приводит (рис. 5, б) к скачкообразному увеличению длительности переходного процесса).

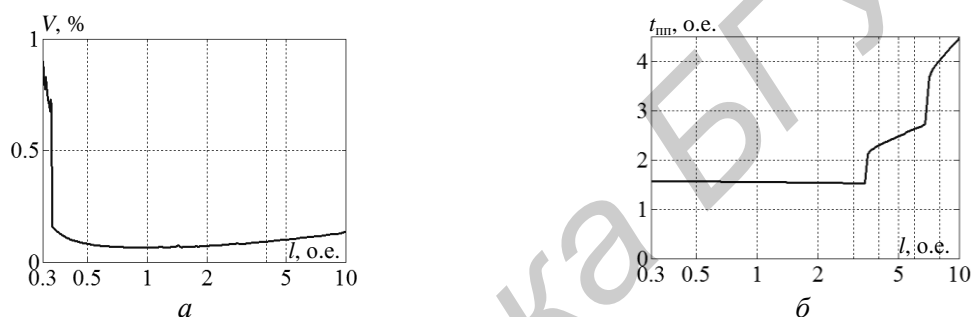


Рис. 5. Результаты исследования чувствительности системы управления к изменениям длины подвеса груза: а – зависимость амплитуды остаточных колебаний от длины подвеса груза; б – зависимость длительности переходного процесса от длины подвеса груза

В целом можно отметить, что длительность переходного процесса при управлении нечетким контроллером составляет примерно 1,5 периода недемпфированных колебаний груза. Анализ работы системы управления с НЛФ позволяет также сделать вывод, что характер переходного процесса сильно зависит от начальных условий, а система управления с нечетким контроллером характеризуется различной степенью подавления колебаний (под степенью подавления колебаний подразумевается характеристика, обратная V), определяемой начальной скоростью тележки (моста).

Системы управления ПТМ с НЛФ позволяют достаточно просто учесть все ограничения применяемого оборудования, однако качество их функционирования во многом определяется качеством используемой базы правил (базы знаний, экспертной системы) и настройкой функций принадлежности. Системы с НЛФ рекомендуется [6, 10] использовать для управления сложными процессами, когда не существует строгого математического описания и простой математической модели, для нелинейных систем высокого порядка и в тех случаях, когда должна производиться обработка лингвистически сформулированных экспертных знаний. Применение нечеткого управления не рекомендуется, если приемлемый результат может быть получен с использованием классической теории автоматического управления и если существует формализованная и адекватная математическая модель рассматриваемой системы [12]. По этим причинам применение НЛФ для управления ПТМ усложняет процесс управления и требует проектирования новой системы управления для каждого конкретного применения [5, 13]. При этом получившаяся система управления не может быть оптимальной. Попытки приблизиться к оптимальным показателям, например путем использования генетических алгоритмов, приводят к необходимости выделения значительных вычислительных ресурсов [12, 13].

Заключение

Системы управления ПТМ на основе стандартных регуляторов не являются гибкими, имеют жесткие характеристики, которые закладываются еще на этапе проектирования. При реализации таких систем управления на практике необходимо учитывать изменение параметров объекта управления, пересчитывать характеристики регуляторов и систем учета ограничений электроприводов. Все это усложняет итоговую систему и приводит к ее удорожанию. Преимуществами системы с НЛФ являются относительная простота процесса синтеза регулятора, простота практического применения, возможность учета реально существующих ограничений электроприводов, простота реализации. Полученные в данной работе результаты показывают, что такие системы управления не позволяют приблизиться к оптимальным показателям качества [9, 11], однако способны обеспечить стабильность характеристик в широком диапазоне. Важным показателем применимости алгоритмов управления на практике является слабая чувствительность системы управления к изменениям приведенной длины подвеса груза. По результатам проведенных исследований (рис. 5) можно сделать вывод, что управление с НЛФ позволяет достичь высоких показателей качества в условиях параметрической неопределенности объекта управления.

ANTI-SWAY CONTROL OF HOISTING-AND-TRANSPORT MECHANISM USING FUZZY ALGORITHM

O.A. SHVEDOVA, A.S. SHMARLOUSKI, A.V. MARKOV, T.V. TARASEVICH

Abstract

The algorithms to suppress oscillations that occur during the movement of payload by hoisting-and-transport mechanism are presented. The use of fuzzy logic provides quite simple to implement a control unit and take into account actual constraints of drives. Anti-sway control based on fuzzy logic has a good performance, even in the case of changing length of the payload cable in a wide range, as it's shown by simulation.

Список литературы

1. *Nalley M.J.* // Journal of Intelligent Fuzzy System. 2000. Vol. 8. P. 1–18.
2. *Lee H.H.* // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation. 2001. P. 56–61.
3. *Liu D.* Adaptive sliding mode fuzzy control for two-dimensional overhead crane. *Mechatronics.*, 2005.
4. *Wahyudi.* // Proceedings of The 2nd International Conference on Mechatronics. 2005. P. 345–351.
5. *Постников В.Г.* Оптимизация позиционных электроприводов автоматизированных систем на основе фаззи-контроллера : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007.
6. *Терехов В.М.* Системы управления электроприводов М., 2005.
7. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений М., 1976.
8. *Szpytko J.* Adaptation control technique of overhead crane mechanisms [Electronic resource]. – Mode of access : <http://med.ee.nd.edu/MED11/pdf/papers/iv11-01.pdf>. – Date of access : 24.04.2013.
9. *Кузнецов А.П., Марков А.В., Шмарловский А.С.* // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. БГУИР, Минск, 19 марта 2009 г. С. 102–103.
10. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М., 2007.
11. *Марков, А.В., Шмарловский А.С.* // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Седьмой междунар. науч.-техн. конф., Минск, май 2009 г. В 3 т Т. 1. С. 167.
12. *Народицкий А.Г.* Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. СПб., 2004.
13. *Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова. М., 2001.*