

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ГИДРОПРИВОДАМИ

© 2019

А.В. Месропян, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной гидромеханики*Р.Р. Шарипов*, аспирант кафедры прикладной гидромеханики*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа (Россия)*

Ключевые слова: рулевая машина; системы управления; нечеткий логический регулятор; математическое моделирование; электрогидравлический привод; нечеткая логика; ПИД-регулятор.

Аннотация: В работе рассматривается возможность применения интеллектуальных регуляторов в качестве корректирующих и задающих устройств исполнительных гидроприводов различного назначения. Предложен способ позиционного управления рулевым гидравлическим приводом с нечетким логическим регулятором (НЛР). Корректирующее воздействие НЛР реализовано на основе трех входных параметров, аналогично классическому пропорционально-интегрально-дифференцирующему регулятору. Для оценки эффективности применения НЛР в системе позиционирования гидропривода разработана математическая модель, описывающая работу сложной электрогидромеханической системы, включающей электромеханический преобразователь, струйный гидроусилитель, исполнительный гидроцилиндр. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода реализована в MatLab Simulink, средствами Fuzzy Logic Toolbox был сформирован НЛР пропорционально-интегрально-дифференцирующего типа. Параметры НЛР задавались экспертной базой лингвистических правил и изменением формы функций принадлежности, варьируя которые можно получить линейные и нелинейные выходные характеристики. Полученная кусочно-линейная гиперплоскость управляющей характеристики НЛР, определяющая нелинейный характер коррекции, теоретически позволяет получить улучшенное качество переходных процессов. Оценена эффективность алгоритмов управления с классическими регуляторами и аналогичными нечеткими регуляторами в условиях известной математической модели объекта управления (электрогидравлический следящий привод) методом численного эксперимента. При синтезе НЛР пропорционального типа сформирован нелинейный закон регулирования, который позволил компенсировать нелинейность гидравлической исполнительно-приводной системы. При реализации линейной зависимости НЛР пропорционально-интегрального типа система показывает поведение, соответствующее традиционному регулятору. Синтезированный НЛР с нелинейной характеристикой не показал значительного улучшения качества переходного процесса по сравнению с классическим регулятором. На основе полученных результатов сделаны выводы о целесообразности применения НЛР в системах управления с гидравлическими исполнительными элементами.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы управления (СУ) летательными аппаратами (ЛА) являются сложными многоконтурными, многокомпонентными и высоконагруженными динамическими системами с высоким уровнем обеспечения надежности. Основным трендом развития данных систем является использование цифровых систем управления и применение адаптивных алгоритмов в сочетании с энергоемкими исполнительными механизмами на гидравлической элементной базе [1–3]. Широкий диапазон эксплуатационных условий и высокие требования к динамике полета современных летательных аппаратов (в том числе беспилотных) обуславливают необходимость точного воспроизведения команд управления исполнительными механизмами управления (рулевыми плоскостями, агрегатами управления вектором и модулем тяги). Применение интеллектуальных методов управления (управление посредством нечеткой логики и нейросетей) в гидравлических следящих приводах СУ ЛА различного назначения является одним из перспективных вариантов решения задач по обеспечению эффективной работы систем управления с требуемыми показателями на установившихся и неуставившихся режимах работы.

Использование нечеткой логики позволяет обрабатывать неопределенные (недоопределенные) данные и ситуации, используя ассоциативный подход, и получать требуемые законы управления в широком диапазо-

не варьируемых параметров [4; 5]. Свойства нечеткой логики (fuzzy logic) обрабатывать неполную информацию и выдавать обоснованные решения определяют возможность использования ее для мониторинга в реальном времени сложных технологических процессов, а также для решения проблем, связанных с практической реализацией алгоритмов, методов, имитационных моделей в управлении техническими системами. Регуляторы, построенные на базе нечеткой логики, способны обеспечить более высокие показатели качества переходных процессов по сравнению с классическими регуляторами. Кроме того, используя методы синтеза нечетких алгоритмов управления, можно выполнять оптимизацию сложных контуров регулирования без необходимости трудоемких исследований и математического моделирования и формировать законы управления без использования громоздких аналитических вычислений. Все это определяет весомые преимущества применения данного подхода при разработке перспективных интеллектуальных СУ со стохастическим характером изменения параметров системообразующих элементов.

Системы управления, основанные на теории нечетких множеств и нейрокомпьютерного управления, позволяют значительно повысить эксплуатационные характеристики высоконагруженных быстродействующих гидроприводов за счет совершенствования алгоритмов управления и коррекции на всех режимах работы СУ ЛА.

Цель исследования – анализ и оценка эффективности применения нечеткой логики в системах управления исполнительными гидроприводами.

КОРРЕКЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ В ГИДРОПРИВОДЕ

Система коррекции на основе пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора является эффективным инструментом достижения необходимых параметров. Синтез оптимальной системы управления по заданным параметрам осуществляется на основе модели управляемого объекта и информации о дифференциальной и интегральной составляющих сигнала управления. В условиях неопределенной модели объекта управления возможно использование эмпирических методик (Зиглера – Николса и др.) [6–8].

Система с ПИД-регулятором позиционного управления в общем виде описывается следующим образом:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

где $u(t)$ – значение сигнала управления;
 K – коэффициент усиления (пропорциональности);
 $e(t)$ – ошибка регулирования;
 T_i и T_d – постоянные времени интегрирования и дифференцирования.

ПИД-регулятор представляет собой линейный регулятор, позволяющий корректировать управляющее воздействие с учетом накопления и диссипации энергии в процессе функционирования и управления.

При реализации ПИД управления средствами нечеткой логики система приобретает ряд качественных изменений: возможность реализации нелинейной зависимости по входным параметрам, использование экспертной информации в виде лингвистических правил. Разработка нечеткой системы регулирования – нечеткого логического регулятора – сопряжена с решением обширного круга задач: выбор алгоритма фазификации (приведение в «нечеткость»), дефазификации (обратное преобразование), выбор параметров алгоритма и др. Среди алгоритмов нечеткой логики наиболее распространены модели Мамдани, Тсукамото, Сугено [9; 10], для реализации которых необходимо задать множество параметров (в отличие от классических регуляторов) для получения необходимого закона управления, в связи с этим вопрос синтеза параметров для конкретной технической системы весьма актуален. Несмотря на сложность синтеза параметров нечеткого логического регулятора, требуемые характеристики объекта управления достигаются путем использования лингвистического подхода настройки параметров нечеткого логического регулятора (НЛР) за сравнительно малое количество итераций настройки.

В основе функционирования НЛР ПИД типа лежит определяющий алгоритм с тремя входными параметрами одного сигнала: значение отклонения (ошибка), дифференциал от ошибки и интегральная составляющая ошибки управления, для упрощенных пропорционального (П), пропорционально-интегрального (ПИ), пропорционально-дифференциального (ПД) регуляторов количество параметров меньше (рис. 1).

Декомпозицию задачи синтеза для НЛР ПИД типа можно представить как выбор постоянных при пропорциональном, дифференциальном и интегральном звене регулятора (для НЛР постоянные представлены в виде функций). Соответствующие параметры регулятора отвечают за быстродействие (пропорциональное звено), уменьшение перерегулирования (дифференциальная составляющая), уменьшение статической ошибки (интегральная составляющая).

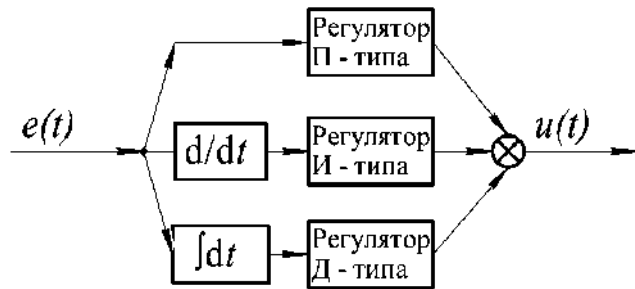


Рис. 1. Декомпозиция закона управления ПИД-регулятора

Управляющая поверхность классического ПИД-регулятора представляет собой многомерную плоскость, определяющую линейную зависимость входных и выходных параметров регулятора. Параметры регулирования во времени определяются формой функций принадлежности, лингвистическими правилами и их весами, возможен синтез параметров, обеспечивающий линейную характеристику НЛР, аналогично классическому ПИД-регулятору.

Система параметров НЛР представляет собой три класса изменяемых параметров: базовый алгоритм нечеткого вывода и методы фазификации и дефазификации, система лингвистических правил (база правил) и их веса, форма функций принадлежности и их характеристика. Совокупность параметров НЛР определяет характеристики и форму управляющей плоскости.

База правил является лингвистической формализацией закона управления и, в зависимости от количества дискретных термов (состояний) и множеств входных и выходных переменных, увеличивается экспоненциально, для 3 входных переменных и одной выходной с 5 термами каждая потенциальное количество правил достигает 125. Для синтеза подобной многомерной структуры применяют подходы традиционного синтеза ПИД-регуляторов – раздельного синтеза параметров составляющих ошибки управления.

На основании информации об ошибке управления НЛР формирует нелинейную коррекцию управляющего воздействия, что позволяет достичь требуемых показателей качества управления системами исполнительных гидроприводов, недоступных при использовании классических регуляторов [11].

Опыт применения нелинейной коррекции говорит о ее большей практической эффективности [12–14], что определяет актуальность разработки математических моделей объектов управления с НЛР и исследование динамических показателей исполнительных гидроприводов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ГИДРОПРИВОДА

Исполнительные устройства на гидравлической элементной базе характеризуются сложным математическим описанием комплекса энергетических преобразований: гидравлических, электрических и механических процессов. Математическая модель основана на математическом описании отдельных функциональных элементов привода: насосной установки с постоянным давлением питания, системы обработки сигнала управления (согласователи сигнала) (рис. 2), системы коррекции электрического сигнала, системы электромеханического преобразования, системы гидравлического усиления сигнала, исполнительного гидромеханического преобразователя.

При моделировании НЛР в системе привода обработка сигналов усложняется, и она не может быть пред-

ставлена в чисто аналоговой форме, дискретизация процесса необходима для расчета значений алгоритма нечеткой логики [15]. Частота дискретизации процесса управления 2000 Гц обеспечивает достаточное процессорное время для расчета значений управляющего воздействия по заданному алгоритму нечеткой логики и бесперебойное управление гидроприводом.

Структурная схема электрогидравлического следящего привода с НЛР представлена на рис. 3.

Ввиду сложности учета всех физических закономерностей, характеризующих работу гидравлического исполнительного элемента, принят ряд следующих допущений:

- коэффициенты расхода, восстановления давления, давления питания и слива – постоянные;
- гистерезис и взаимоиндукция в ЭМП отсутствуют (линейная зависимость по току управления);

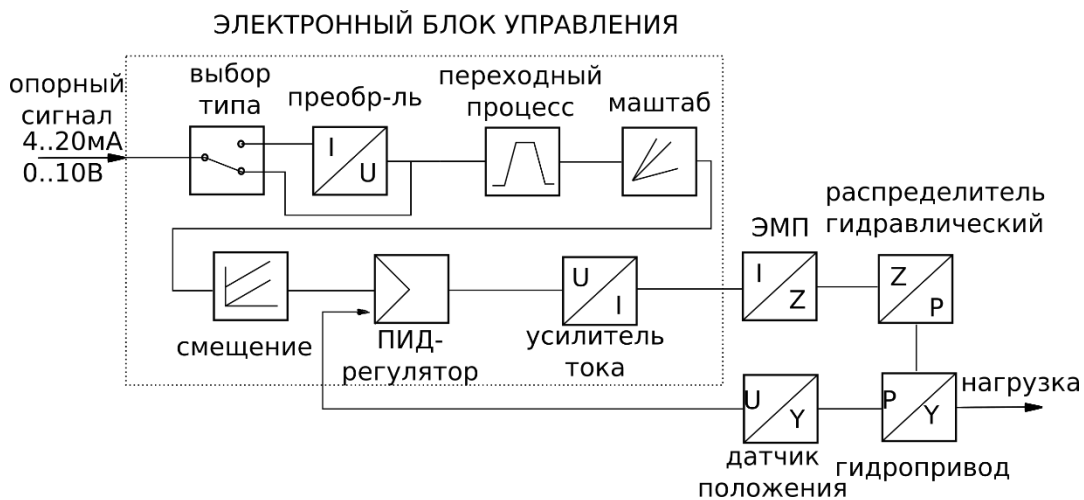


Рис. 2. Электронный блок управления в составе гидропривода

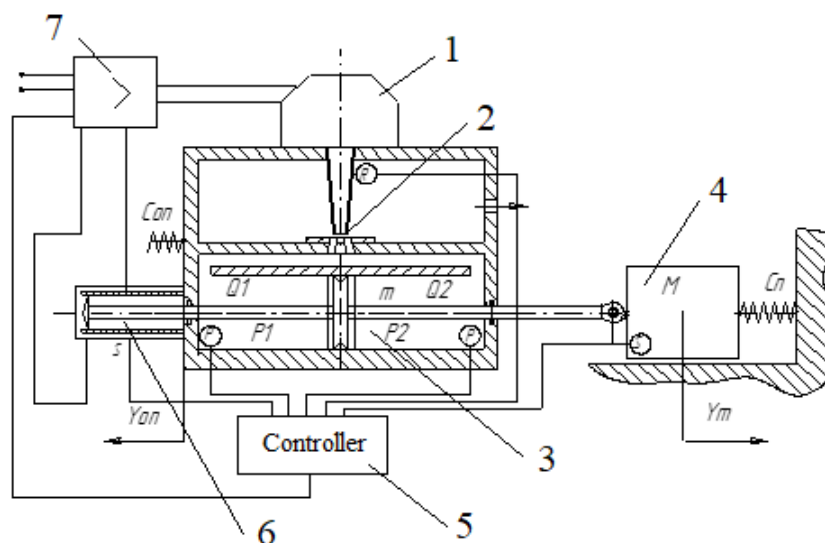


Рис. 3. Электрогидравлический следящий привод:

- 1 – электромеханический преобразователь; 2 – струйная трубка;
- 3 – гидроцилиндр; 4 – инерционная нагрузка; 5 – контроллер;
- 6 – датчик обратной связи; 7 – усилитель сигнала ошибки

– температура рабочей жидкости в течение рассматриваемого динамического процесса не изменяется;
 – объемные потери в подводящих линиях в гидрораспределителе и гидродвигателе малы, и ими пренебрегаем;
 – волновые процессы в гидролиниях из-за их малой длины на рабочие процессы гидропривода не влияют;
 – нерастворенный воздух в системе отсутствует;
 – трение в гидроцилиндре и в нагрузке мало, и им можно пренебречь.

Уравнение электрической цепи ЭМП [16; 17]:

$$U = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} + K_{ne} \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2)$$

где U – напряжение на обмотке электрохимического преобразователя (ЭМП);

I – ток в обмотке управления;

K_{ne} – коэффициент противо-ЭДС;

R – сопротивление обмотки управления;

L – индуктивность обмотки управления.

Уравнение движения струйной трубки:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = K_{mi} \cdot I - K_{ma} \cdot \alpha - b \cdot \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3)$$

где J – момент инерции якоря ЭМП;

α – угол поворота якоря ЭМП;

K_{mi} – коэффициент моментной характеристики;

K_{ma} – коэффициент, характеризующий жесткость пружины;

b – коэффициент вязкого трения.

Уравнение расхода жидкости через гидроцилиндр [18; 19]:

$$Q = A \frac{dy}{dt} + \frac{W_0 + A \cdot y}{E} \frac{dP_d}{dt}, \quad (4)$$

где A – эффективная площадь гидроцилиндра;

y – положение штока гидроцилиндра;

W_0 – постоянный объем в камерах гидроцилиндра;

P_d – перепад давления в гидроцилиндре.

Расход жидкости регулируется положением струйной трубки, с учетом насыщения описывается уравнением:

$$Q = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta_Q \left[(1+z) \sqrt{1 - \frac{P_d}{\xi_P}} - (1-z) \sqrt{1 - \frac{P_d}{\xi_P}} \right], & z < z_n \\ \eta_Q \sqrt{1 - \frac{P_d}{\xi_P}}, & z > z_n \end{cases}, \quad (5)$$

где μ_Q – коэффициент расхода;

ξ_P – коэффициент восстановления давления;

z – перемещение струйной трубки;

z_n – перемещение струйной трубки, характеризующее переход в зону насыщения.

Уравнение, описывающее динамику перемещения нагрузки:

$$M \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = A \cdot P_d - R - C_y - b \frac{dy}{dt} - F_{tr}, \quad (6)$$

где M – приведенная к оси штока масса нагрузки;

R – усилие на штоке гидроцилиндра;

b – коэффициент вязкого трения;

C_y – величина позиционной нагрузки;

F_{tr} – сила трения покоя.

Моделирование динамических процессов учитывает особенности совместного использования НЛР с аналоговой исполнительной системой.

АНАЛИЗ КОРРЕКЦИИ ЭГСП НЛР П-ТИПА

Нечеткий логический регулятор П-типа реализует в общем случае нелинейный закон управления (возможна реализация линейного закона). Рассмотрим коррекцию управления простейшим регулятором с семью правилами:

1) если $e = \langle \text{ОБ} \rangle$, то $u = \langle \text{ОБ} \rangle$;

2) если $e = \langle \text{ОС} \rangle$, то $u = \langle \text{ОС} \rangle$;

3) если $e = \langle \text{ОМ} \rangle$, то $u = \langle \text{ОМ} \rangle$;

4) если $e = \langle \text{Н} \rangle$, то $u = \langle \text{Н} \rangle$;

5) если $e = \langle \text{ПМ} \rangle$, то $u = \langle \text{ПМ} \rangle$;

6) если $e = \langle \text{ПС} \rangle$, то $u = \langle \text{ПС} \rangle$;

7) если $e = \langle \text{ПБ} \rangle$, то $u = \langle \text{ПБ} \rangle$,

где $\langle \text{ОБ} \rangle$, $\langle \text{ОС} \rangle$, $\langle \text{ОМ} \rangle$, $\langle \text{Н} \rangle$, $\langle \text{ПМ} \rangle$, $\langle \text{ПС} \rangle$, $\langle \text{ПБ} \rangle$ – лингвистические метки [20]: «отрицательное большое», «отрицательное среднее», «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное среднее», «положительно большое»;

e – ошибка позиционирования;

u – управляющее воздействие.

Представленные правила описывают этапы переходного процесса (разгон, торможение, стабилизацию) с возможностью обозначить требуемое управляющее воздействие на объект управления на каждом этапе переходного процесса.

Изменение положения полюсов входных и выходных термов на весовой функции (рис. 4) в процессе управления приводит к изменению развиваемых усилий на выходном звене, что позволяет сформировать требуемый нелинейный закон регулирования, при этом нелинейная управляющая характеристика НЛР (рис. 5) позволяет компенсировать нелинейность гидравлической исполнительной системы привода.

Специфика функционирования гидравлических исполнительных приводов предполагает наличие большой инерционной нагрузки, в связи с чем на определенных режимах работы возникает перерегулирование (рис. 6) [21].

Нелинейная характеристика НЛР способствует уменьшению перерегулирования системы с 13 до 3 %, что свидетельствует о целесообразности применения НЛР в исполнительном гидроприводе систем с высокими требованиями к качеству переходного процесса.

АНАЛИЗ КОРРЕКЦИИ ЭГСП НЛР ПД-ТИПА

Нелинейный регулятор П-типа может обеспечивать удовлетворительные показатели качества без использования дополнительной информации об объекте, однако в условиях изменяющихся внешних нагрузок математически ожидаемое поведение может отличаться от реального. Положительная нагрузка на объект управления оказывает значительное влияние на скорости перемещения, а также на значения перерегулирования. Ограничение нарастания скорости и ускорения является эффективным методом борьбы с перерегулированием и достижением устойчивости механизма.

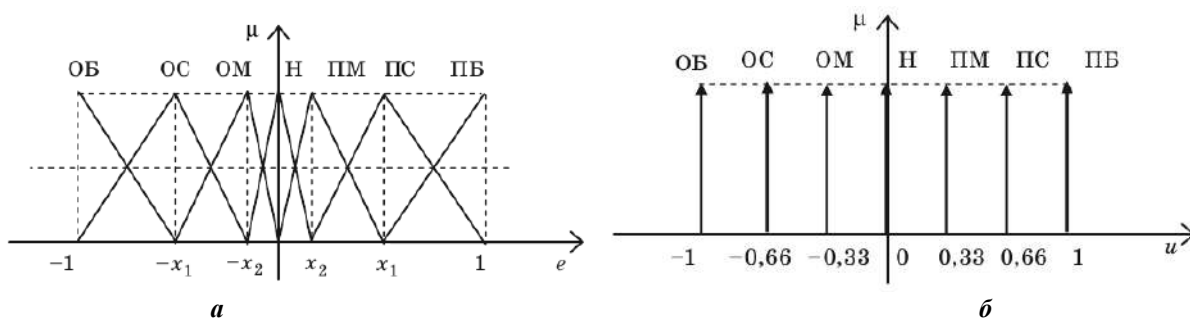


Рис. 4. Входные (а) и выходные термы НЛР (б)

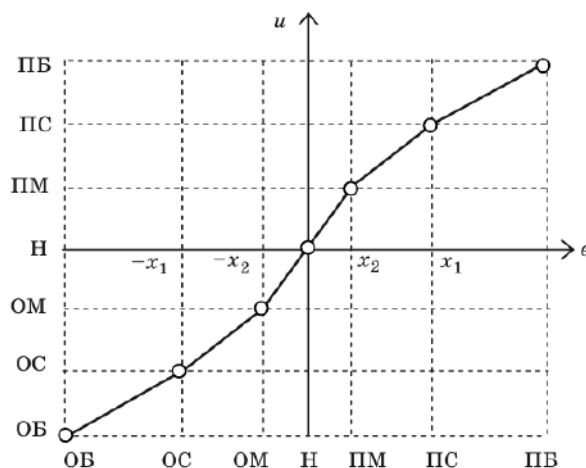


Рис. 5. Управляющая характеристика НЛР П-типа

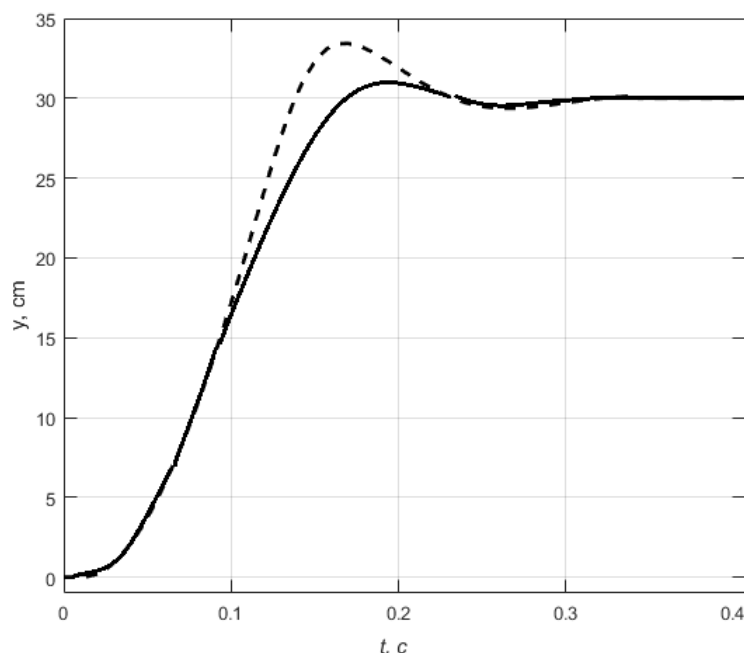


Рис. 6. Переходный процесс системы с НЛР и пропорциональным регулятором

При синтезе НЛР ПД-типа нелинейная зависимость пропорционального коэффициента усиления (П-тип) не играет особой важности, функции демпфирования и усиления берет на себя Д-составляющая НЛР. Для

синтеза НЛР ПД-типа коэффициент усиления увеличивают до достижения границы неустойчивости (периодический переходный процесс) по методике Зиглера – Николса, управляющее воздействие определяется как

Таблица 1. Лингвистические правила закона управления НЛР

(de/dt)*	e*						
	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н
ОС	ОБ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ
ОМ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС
Н	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
ПМ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ	ПБ
ПС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ	ПБ	ПБ
ПБ	Н	ПМ	ПС	РБ	ПБ	ПБ	ПБ

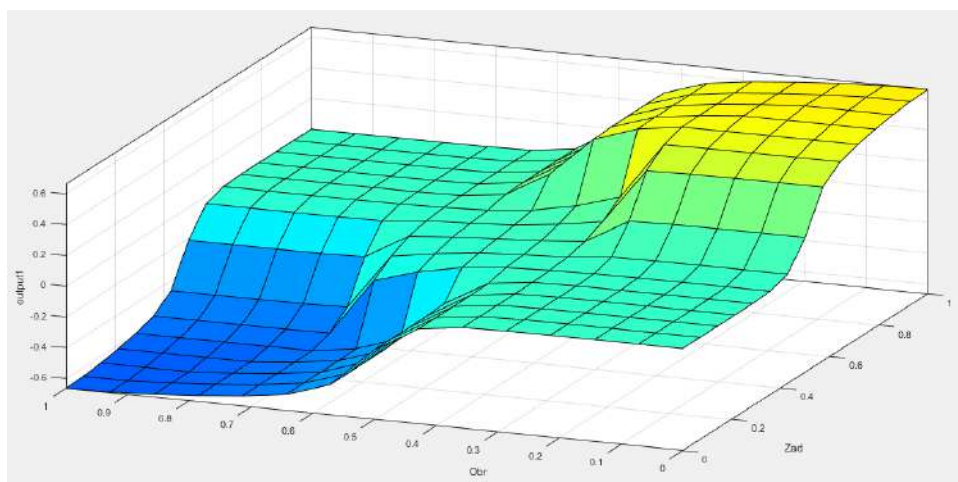


Рис. 7. Управляющая характеристика НЛР ПД-типа

$$u^* = e^* + (de/dt)^*$$

Входные термы и выходной терм определяются 7 функциями принадлежности, что дает 49 управляющих правил, представленных в таблице 1.

Управляющая характеристика НЛР ПД-типа представлена в виде кусочно-линейной гиперплоскости (рис. 7).

При реализации линейной зависимости НЛР ПД-типа система показывает соответствующее поведение традиционного ПД-регулятора. При нелинейной характеристике не удалось достичь значимого улучшения качества переходного процесса по сравнению с ПД-регулятором. По результатам моделирования можно сделать вывод о нецелесообразности применения сложной системы дискретного управления посредством нечеткой логики в случаях управления по нескольким составляющим сигнала управления.

ВЫВОДЫ

По результатам анализа смоделированных переходных процессов исполнительного привода и особенностей функционирования системы управления с НЛР сделаны следующие выводы.

1. Адаптированная методика Зиглера – Николса синтеза НЛР ПИД-типа позволяет синтезировать опти-

мальный регулятор, исключая при этом проведение трудоемких процедур выбора и уточнения параметров регулятора.

2. НЛР П-типа превосходит по параметрам классическое пропорциональное управление и обеспечивает более качественные динамические характеристики исполнительного гидропривода благодаря нелинейной форме управляющей плоскости.

3. При наличии информации об объекте управления эффективность применения НЛР ПД-типа и ПИД-типа в системах позиционирования гидроприводами, по сравнению с классическими регуляторами, не столь очевидна, необходимы дальнейшие исследования.

Обобщая вышеизложенное, можно отметить целесообразность применения НЛР в системе управления исполнительными гидроприводами систем с высокими требованиями к качеству переходного процесса, а при отсутствии информации об условиях эксплуатации НЛР является универсальным и эффективным инструментом достижения требуемых параметров переходных процессов при позиционировании исполнительного гидропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ursu I., Tecuceanu G., Toader A., Calinoiu C. Switching neuro-fuzzy control with antisaturating logic // Proceedings

- of the Romanian Academy Series A – Mathematics Physics Technical Sciences information Science. 2011. Vol. 12. № 3. P. 231–238.
2. Lail W.Y., Onn N., Hing Tang C.H. Position Control of Hydraulic Actuators Using Fuzzy Pulse Width Modulation // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 735. P. 294–298.
 3. Li B., Yan J., Guo G., Zeng Y., Luo W. High performance control of hydraulic excavator based on fuzzy-PI soft-switch controller // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*. 2011. Vol. 2. P. 676–679.
 4. Бураков М.В., Кирпичников А.П. Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 4. С. 242–244.
 5. Карпович Д.С., Шумский А.Н., Сарока В.В. Система управления беспилотным летательным аппаратом с применением теории нечетких множеств // *Труды БГТУ*. № 6. Физико-математические науки и информатика. 2016. № 6. С. 111–116.
 6. Бураков М.В., Коновалов А.С. Синтез нечетких логических регуляторов // *Информационно-управляющие системы*. 2011. № 1. С. 22–37.
 7. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.
 8. Голосовский М.С., Богомолов А.В., Теребов Д.С., Евтушенко Е.В. Алгоритм настройки системы нечеткого логического вывода типа Мамдани // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Математика. Механика. Физика. 2018. Т. 10. № 3. С. 19–29.
 9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // *IEEE Transactions on Systems Man Cybernet*. 1985. Vol. 15. № 1. P. 116–132.
 10. Матковская М.О. Исследование алгоритмов нечеткого вывода в моделях принятия решений // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2009. № 3. С. 240–244.
 11. Шилин Д.В., Грибков А.М. Исследование закона управления позиционированием каретки бесштокового пневматического привода на базе нечеткого регулятора // *Вестник Московского энергетического института*. 2015. № 3. С. 5–10.
 12. Balea S., Halanay A., Ursu I. New results on the problem of the stabilization of equilibria for models of electrohydraulic servactuators // *Discrete and continuous dynamical systems – Series S*. 2013. Vol. 6. № 6. P. 1551–1567.
 13. Kalyoncu M., Haydim M. Mathematical modelling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servosystem with internal leakage // *Mechatronics*. 2009. Vol. 19. № 6. P. 847–858.
 14. Sidhom L., Chihi I., Brun X., Bideaux E., Thomasset D. On Nonlinear Robust Adaptive Control: Application on Electro-Hydraulic Valve System // *Studies in Computational intelligence*. 2016. Vol. 635. P. 575–594.
 15. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. 557 с.
 16. Месропян А.В. Особенности коррекции электрогидравлических следящих приводов // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2009. № 1. С. 134–144.
 17. Целищев В.А., Целищев Д.В. Гидравлическая машина со струйно-кавитационным регулированием // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2006. Т. 7. № 2. С. 161–165.
 18. Месропян А.В., Галлямов Ш.Р., Целищев В.А. Исследование влияния нелинейностей типа «люфт» и «гистерезис» на гидравлический рулевой привод летательного аппарата // *Проблемы и перспективы авиационного двигателестроения*. Уфа: УГАТУ, 2007. С. 32–37.
 19. Mesropyan A.V., Sharipov R.R. Mathematical modeling of transient processes in the jet pipe servomotor with a dual-mode controller // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 168–172.
 20. Шишкин Д.О., Сумачакова Ч.А., Степанов А.Г. Разработка и реализация модели экспертной системы на основе нечеткой логики // *Актуальные проблемы экономики и управления*. 2018. № 1. С. 75–80.
 21. Прокопьев А.П. Особенности синтеза регулятора электрогидравлической системы управления // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 307–317.

REFERENCES

1. Ursu I., Tecuceanu G., Toader A., Calinoiu C. Switching neuro-fuzzy control with antisaturating logic. *Proceedings of the Romanian Academy Series A – Mathematics Physics Technical Sciences information Science*, 2011, vol. 12, no. 3, pp. 231–238.
2. Lail W.Y., Onn N., Hing Tang C.H. Position Control of Hydraulic Actuators Using Fuzzy Pulse Width Modulation. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 735, pp. 294–298.
3. Li B., Yan J., Guo G., Zeng Y., Luo W. High performance control of hydraulic excavator based on fuzzy-PI soft-switch controller. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, 2011, vol. 2, pp. 676–679.
4. Burakov M.V., Kirpichnikov A.P. Fuzzy PID Controller for nonlinear plant. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 242–244.
5. Karpovich D.S., Shumskiy A.N., Saroka V.V. Control system of an unmanned aerial vehicle using the theory of fuzzy sets. *Trudy BGTU. № 6. Fiziko-matematicheskie nauki i informatika*, 2016, no. 6, pp. 111–116.
6. Burakov M.V., Kononov A.S. Fuzzy Controllers Design. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2011, no. 1, pp. 22–37.
7. Gostev V.I. *Proektirovanie nechetkikh regulyatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Designing fuzzy regulators for automatic control systems]. Sankt Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011. 416 p.
8. Golosovskiy M.S., Bogomolov A.V., Terebov D.S., Evtushenko E.V. Algorithm to adjust fuzzy inference system of Mamdani type. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 19–29.

9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems Man Cybernet*, 1985, vol. 15, no. 1, pp. 116–132.
10. Matkovskaya M.O. Research of algorithms of the fuzzy conclusion in decision-making models. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 3, pp. 240–244.
11. Shilin D.V., Gribkov A.M. Study of the law positioning rodless pneumatic actuators based on fuzzy regulator. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2015, no. 3, pp. 5–10.
12. Balea S., Halanay A., Ursu I. New results on the problem of the stabilization of equilibria for models of electrohydraulic servoactuators. *Discrete and continuous dynamical systems – Series S*, 2013, vol. 6, no. 6, pp. 1551–1567.
13. Kalyoncu M., Haydim M. Mathematical modelling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servosystem with internal leakage. *Mechatronics*, 2009, vol. 19, no. 6, pp. 847–858.
14. Sidhom L., Chihi I., Brun X., Bideaux E., Thomasset D. On Nonlinear Robust Adaptive Control: Application on Electro-Hydraulic Valve System. *Studies in Computational intelligence*, 2016, vol. 635, pp. 575–594.
15. Olsson G., Piani D. *Tsifrovye sistemy avtomatizatsii i upravleniya* [Digital Automation and Control Systems]. Sankt Petersburg, Nevskiy Dialekt Publ., 2001. 557 p.
16. Mesropyan A.V. Peculiarities of electrohydraulic servo drive correction. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2009, no. 1, pp. 134–144.
17. Tselishchev V.A., Tselishchev D.V. State and development problems of the jet hydraulic control-surface actuators. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 7, no. 2, pp. 161–165.
18. Mesropyan A.V., Gallyamov Sh.R., Tselishchev V.A. Investigation of the influence of non-linearities of “play” and “hysteresis” on the aircraft’s hydraulic steering gear. *Problemy i perspektivy aviatsionnogo dvigatelestroeniya*. Ufa, UGATU Publ., 2007, pp. 32–37.
19. Mesropyan A.V., Sharipov R.R. Mathematical modeling of transient processes in the jet pipe servoactuator with a dual-mode controller. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 168–172.
20. Shishkin D.O., Sumachakova Ch.A., Stepanov A.G. Development and implementation of model expert system based on fuzzy logic. *Aktualnye problemy ekonomiki i upravleniya*, 2018, no. 1, pp. 75–80.
21. Prokopev A.P. Peculiarities of the synthesis of controller electro-hydraulic control system. *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014*. Moscow, Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN Publ., 2014, pp. 307–317.

ON THE EFFICIENCY OF FUZZY LOGIC APPLICATIONS IN HYDRAULIC ACTUATOR CONTROL SYSTEMS

© 2019

A.V. Mesropyan, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor,
professor of Chair of Applied Hydromechanics

R.R. Sharipov, postgraduate student of Chair of Applied Hydromechanics
Ufa State Aviation Technical University, Ufa (Russia)

Keywords: steering machine; control systems; fuzzy logic controller; mathematical modeling; electro-hydraulic actuator; fuzzy logic; PID controller.

Abstract: The paper considers the possibility to apply intelligent controllers as setting devices and adjusters of hydraulic actuators of different purpose. The authors proposed a method of positioning control of a hydraulic steering actuator based on a fuzzy logic controller (FLC). FLC corrective action is implemented based on three input parameters similar to the traditional proportional-integral-derivative controller. To evaluate the efficiency of FLC application in the system of hydraulic actuator positioning, the authors developed a mathematical model describing the work of a complex electro-hydraulic system including electromechanical converter, fluidic hydraulic actuator, and hydraulic cylinder actuator. Non-linear mathematical model of an electro-hydraulic servo is implemented in MatLab Simulink software; the proportional-integral-derivative FLC was formed using the Fuzzy Logic Toolbox means. The authors set the FLC parameters using the linguistic rule-based expert system and the change in the membership function form, varying which it is possible to get linear and non-linear output characteristics. The obtained piecewise-linear hyperplane of FLC controlling characteristic determining the non-linear nature of correction theoretically allows getting the improved quality of transient processes. Using the numerical experience method, the authors assessed the efficiency of control algorithms with traditional controllers and the equivalent fuzzy controllers within the known mathematical model of a control object (electro-hydraulic follower actuator). When synthesizing the proportional-type FLC, the authors formed the nonlinear control law which allowed compensating the nonlinearity of the hydraulic actuator system. When implementing the linear dependence of the proportional-integral FLC, the system demonstrates the behavior attributable to the traditional controller. Generated FLC with nonlinear characteristics did not show significant quality improvement of the transient process compared to the traditional controller. Based on the received results, the authors concluded the reasonability of FLC application within the control systems with hydraulic actuating elements.