

НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩИМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ПО СКОРОСТИ

А.А. УСОЛЬЦЕВ, канд. техн. наук, Н.А. СМИРНОВ, асп.

Рассматривается задача ограничения скорости следящего электропривода в рамках допустимых значений для различных типов воздействий на электропривод. Предлагается решение поставленной задачи в виде системы регулирования положения с нечетким регулятором, имеющим дополнительный вход по скорости объекта.

Ключевые слова: нечеткая логика, фаззи-логика, следящий электропривод, ограничение скорости.

FUZZY CONTROLLER IN SERVO DRIVE CONTROL SYSTEM WITH SPEED LIMITATION

A.A. USOLTSEV, Candidate of Engineering, N.A. SMIRNOV, Post Graduate Student

The authors consider the problem servo drive speed limitation within the permissible values rates in condition of different impacts types. Control System with a fuzzy logic controller included an additional input is offered as a solution.

Keywords: fuzzy logic, servo drive, speed limitation.

Введение. В настоящее время в составе оптико-электронных комплексов в системах лазерной дальнометрии широко используется безредукторный прецизионный привод. Опорно-поворотное устройство (ОПУ) такого привода с установленными на него исполнительными моментными двигателями и оптическим оборудованием характеризуется низкими скоростями вращения при относительно высоких моментах инерции. При этом ОПУ имеет естественные ограничения скорости поворота. Невысокие значения максимально разрешенной скорости поворота обусловлены требованием отсутствия необратимых механических деформаций при аварийном наезде ОПУ на ограничители угла поворота и предельными нагрузками, испытываемыми оптическим навесным оборудованием комплекса при движении ОПУ. Свое влияние оказывают также нагрузочная способность подшипников и вала устройства, максимальные допустимые токи преобразователя и двигателя ОПУ и общие требования к массогабаритным показателям ОПУ. Но они накладывают менее жесткие ограничения. Для предотвращения выхода из строя ОПУ в контроллер управления приводом телескопа встроена защита от превышения скорости. При превышении максимально разрешенной скорости поворота защита срабатывает и отключает силовое питание привода, блокируя выполнение заданной программы. Таким образом, возникает нештатная ситуация, требующая вмешательства персонала, и происходит сбой цикла слежения за объектом. В связи с этим на системы регулирования положения телескопа возлагается задача удержания скорости движения ОПУ не выше максимально допустимой как при обработке задания по положению, так и при возмущающих внешних воздействиях.

Существуют различные методики, позволяющие ввести ограничения на движение опорно-поворотного устройства. Метод формирования

траектории задания [1], разработанный на кафедре электротехники и прецизионных электромеханических систем (ЭТиПЭМС), ограничивает скорость и ускорение сигнала задания в рамках допустимых значений. Этот метод не допускает работы привода в опасных режимах путем сглаживания сигнала задания при отсутствии внешних возмущений.

Внешние возмущения система регулирования обрабатывает через ошибку по положению в одноконтурной системе или по положению и скорости в двухконтурной. В одноконтурной системе регулирования положения с регуляторами, являющимися функцией сигнала управления от ошибки регулирования, задача ограничения скорости трудновыполнима в связи с тем, что регулятор положения работает по ошибке угла и не учитывает информацию о скорости объекта. Ограничение управления в этом случае не эффективно, так как сигнал управления задает ускорение системы. Замыкание внутреннего контура скорости само по себе не ограничивает скорость объекта и требует введения насыщения выходного сигнала регулятора положения, являющегося заданием по скорости для внутреннего контура. Такому решению присущи следующие недостатки: 1) насыщение выхода регулятора положения уменьшает чувствительность системы по ошибке положения; 2) возможные перерегулирования в контуре скорости не исключают разгона привода выше допустимого уровня даже при наличии ограничений по сигналу задания скорости; 3) постоянная времени двухконтурной системы увеличивается по сравнению с одноконтурной.

В связи с наличием положительного опыта применения нечеткой логики при решении задач управления электроприводом [2, 3], было решено разработать для решения поставленной задачи регулятор на основе нечеткой логики. Предлагаемая ниже одноконтурная система ре-

гулирования угла, имеющая нечеткий регулятор с дополнительным входом по скорости объекта в прямом канале управления, решает задачу удержания скорости вращения опорно-поворотного устройства телескопа в допустимых пределах. Максимально разрешенная скорость объекта задается через коэффициент обратной связи по скорости. Значение скорости перед вводом в регулятор переводится в относительную шкалу, где единице соответствует максимально допустимое значение скорости.

Синтез нечеткого регулятора. Внутренняя структура нечеткого регулятора представлена на рис. 1. Разрабатываемый регулятор включает в себя четыре лингвистические переменные: три входных – ошибка e , скорость изменения ошибки ce и скорость v , и одну выходную – управление du (рис. 2, а). Лингвистические переменные e , ce и du имеют пять термов с нечеткими значениями: «большое отрицательное» (bn), «среднее отрицательное» (mn), «малое» (z), «среднее положительное» (mp) и «большое положительное» (bp). Данное количество термов представляется наиболее удобным и обеспечивает удовлетворительную чувствительность регулятора к изменению состояния системы [3]. В качестве функций принадлежности термам были выбраны треугольные функции, определяемые тремя числами (a, b, c). Границы термов выбраны из условия их симметричности относительно положительных и отрицательных значений входных сигналов. На этапе дефаззификации был использован метод центра тяжести [4].

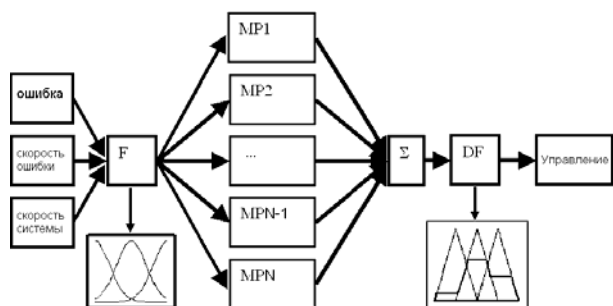


Рис. 1. Структура нечеткого блока регулятора

Угловая скорость вращения объекта (переменная v) используется как дополнительный параметр: когда скорость объекта не выходит из заданного диапазона, ограничений на управление не накладывалось и его величина определяется значением ошибки по заданию и скоростью изменения ошибки. Если скорость объекта приближается к границам диапазона то управление ограничивается вплоть до нуля, когда система разгоняется за заданием, или препятствует разгону, когда система уходит от задания. В связи с этими установками для лингвистической переменной v задано три термина с нечеткими значениями: «большое отрицательное» (bn), «малое» (z) и «большое положительное» (bp). Термы bn и bp определяются треугольными функциями принадлежности, определяемыми тройкой чисел (a, b, c).

Для локализации зоны влияния ограничения по скорости на управление терму z была сопоставлена трапецевидная функция принадлежности, определяемая четверкой чисел (a, b, c, d).

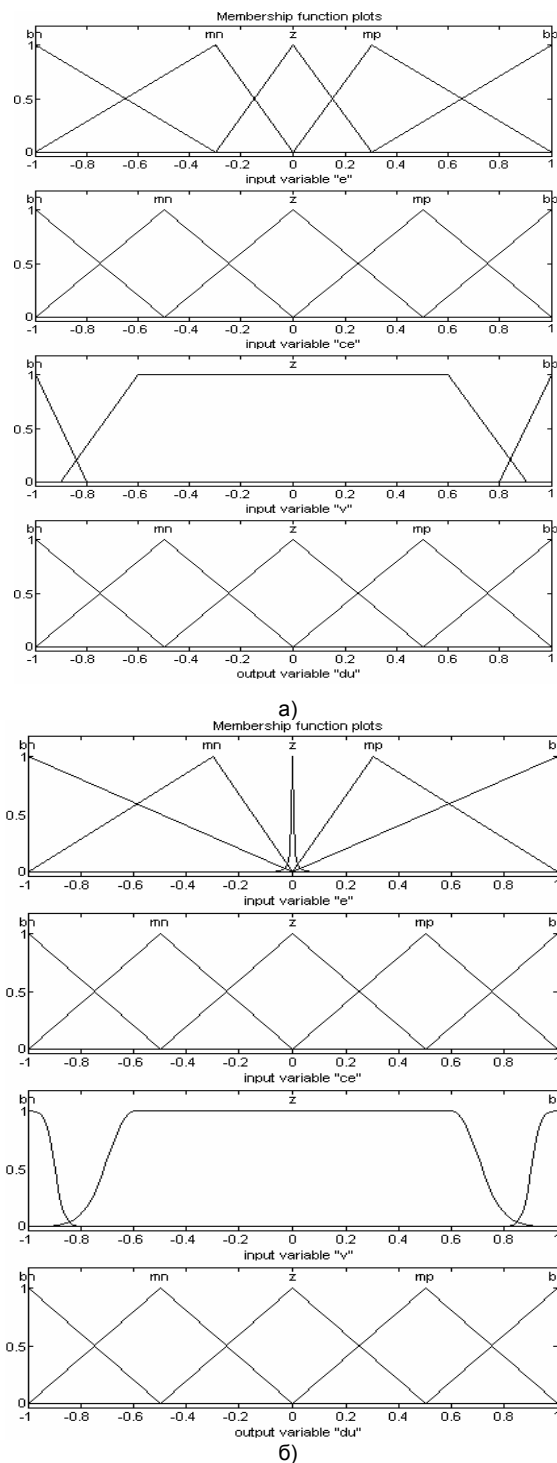


Рис. 2. Функции принадлежности термам лингвистических переменных нечеткого регулятора: а – предварительные; б – скорректированные

После определения количества термов каждой лингвистической переменной и распределения функций принадлежности были синтезированы нечеткие правила вида

$$R_i : \text{ЕСЛИ } e = A_{i1} \text{ И } ce = A_{i2} \text{ И } v = A_{i3}, \text{ ТО } du = B_i,$$

где A_{ij} – множества функций принадлежности i -му терму j -й переменной; B_i – множество функций принадлежности i -му терму выходной переменной. Общее количество нечетких правил равно произведению количества термов входных переменных, т. е. 75 (рис. 3). При таком размере базы правил целесообразно разбить их синтез на несколько этапов.

e \ ce	bn	mn	z	mp	bp
bn	z	z	z	z	z
mn	z	z	z	z	z
z	z	z	z	mp	bp
mp	z	mp	mp	bp	bp
bp	mp	mp	bp	bp	bp

а)

e \ ce	bn	mn	z	mp	bp
bn	bn	bn	mn	mn	mn
mn	bn	bn	mn	mn	z
z	bn	mn	z	mp	bp
mp	z	mp	mp	bp	bp
bp	mp	mp	bp	bp	bp

б)

e \ ce	bn	mn	z	mp	bp
bn	bn	bn	mn	mn	mn
mn	bn	bn	mn	mn	z
z	bn	mn	z	z	z
mp	z	z	z	z	z
bp	z	z	z	z	z

в)

Рис. 3. База нечетких правил регулятора для случаев: а – $v = bn$; б – $v = z$; в – $v = bp$

Вначале были разработаны правила без учета значения скорости объекта, т. е. для случая, когда переменная v соответствует терму z (рис. 3, б). Чем больше ошибка рассогласования

угла поворота ОПУ и задания, тем больше по модулю сигнал управления регулятора. Управление зависит также от скорости изменения ошибки. Если она уменьшается, то требуется меньшее корректирующее воздействие, если увеличивается – большее. Условно приведенную систему из 25 правил можно разделить на две части: ошибка положительна и ошибка отрицательна. В первом случае регулятор формирует положительное управление, во втором – отрицательное.

Затем был введен учет скорости объекта и разработан расширенный блок правил. Для этого движение ОПУ рассматривалось в зависимости от сигнала. Многообразие сочетаний входных переменных регулятора качественно можно разделить на восемь ситуаций:

1. $e \geq 0, ce \geq 0, v \geq 0$;
2. $e \geq 0, ce \geq 0, v \leq 0$;
3. $e \geq 0, ce \leq 0, v \geq 0$;
4. $e \geq 0, ce \leq 0, v \leq 0$;
5. $e \leq 0, ce \geq 0, v \geq 0$;
6. $e \leq 0, ce \geq 0, v \leq 0$;
7. $e \leq 0, ce \leq 0, v \geq 0$;
8. $e \leq 0, ce \leq 0, v \leq 0$;

Графическое представление возможных режимов работы системы (рис. 4, где z – задание, α – угол, e_k, e_{k-1} – ошибка на k и $k-1$ шаге соответственно) упрощает понимание требуемого поведения регулятора. При составлении оставшихся правил удобно рассматривать ситуацию с положительной и отрицательной скоростью отдельно.

При достижении скоростью ОПУ опасных значений задача регулятора – остановить разгон ОПУ и, при необходимости, притормозить его. То есть управление должно быть противоположного знака по отношению к скорости объекта. Исходя из этих соображений, матрица правил трансформируется следующим образом: управление обнуляется, когда его знак совпадает со знаком скорости вращения объекта, и остается ненулевым при противоположных знаках (рис. 3, а, в).

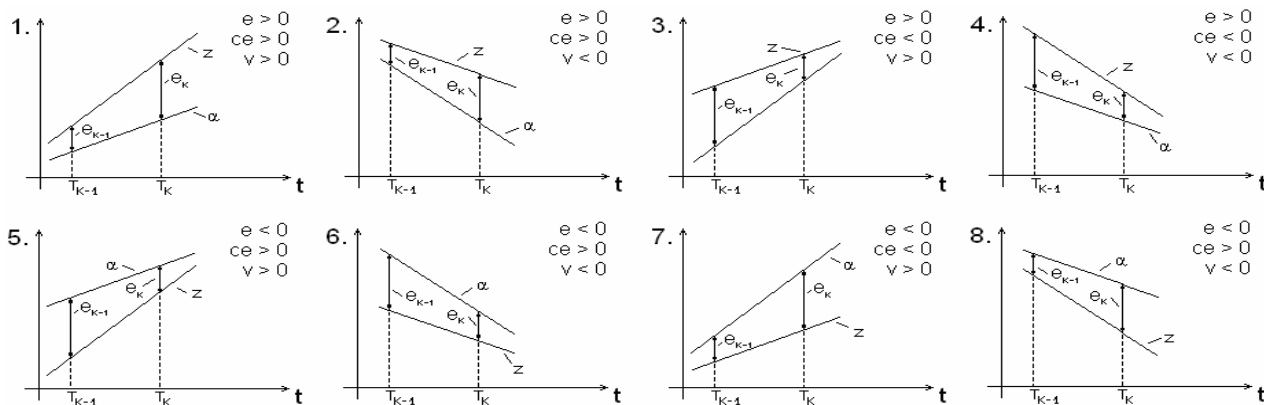


Рис. 4. Графическое представление во времени движения ОПУ

Таким образом, регулятор сбрасывает управление, когда скорость объекта начинает превышать допустимое значение и объект отстает от сигнала задания (рис. 4, схемы 1, 3 для положительной скорости и 6, 8 для отрицательной). Регулятор препятствует также отклонению положения объекта от заданного под воздействием внешних сил и последующей излишне резкой корректировке этого отклонения (рис. 4, схемы 5, 7 для положительной скорости и 2, 4 для отрицательной).

Моделирование в пакете Matlab. Для расчета нечеткого регулятора в программном пакете Matlab была использована модель азимутальной оси ОПУ малого оптического комплекса, который имеется в распоряжении кафедры ЭТиПЭМС и может быть использован как лабораторный стенд. Поворотный механизм ОПУ обладает моментом инерции, равным 0,39 кг·м². Жесткость механической характеристики объекта составляет 1,6 кг·м²/с. Также ОПУ имеет механические резонансы в районе 80 и 200 Гц, что накладывает дополнительные ограничения на систему управления в части подавления механических колебаний ОПУ, проявляющихся в виде акустического шума.

Для наших целей удобно воспользоваться представлением объекта управления в виде передаточной функции с известными параметрами. Задаче определения параметров подобных электромеханических систем посвящено большое количество работ, среди которых можно выделить, например, [5, 6]. В работе [5] стенд, рассматриваемый нами, представлен одномассовой моделью и описывается аperiodическим звеном второго порядка в системе задание – скорость объекта. Для замыкания обратной связи по углу передаточная функция дополняется еще одним интегратором. При этом были получены следующие оценки параметров математической модели привода:

$$W_{ob} = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \frac{1}{s} = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \frac{1}{s},$$

где $b_0 = 1173 \cdot 105$ град·с³/В; $a_1 = 512,3$ с⁻¹; $a_0 = 1173$ с⁻²; T_1, T_2 – постоянные времени объекта; K – коэффициент передачи системы, который можно найти, решив соответствующее квадратное уравнение.

В рамках данной модели не учитываются нелинейности, связанные с неравномерным моментом трения, наличием так называемого кабельного перехода [5], так как математическое описание этих нелинейностей является отдельной исследовательской задачей и выходит за рамки данной статьи. При натурных испытаниях было рассмотрено влияние этих факторов на работоспособность системы.

На основе вышеприведенных соображений и предложенной методики синтеза нечеткого регулятора в программном пакете Matlab была разработана модель замкнутой одномассо-

вой системы регулирования угла с нечетким регулятором (рис. 5).

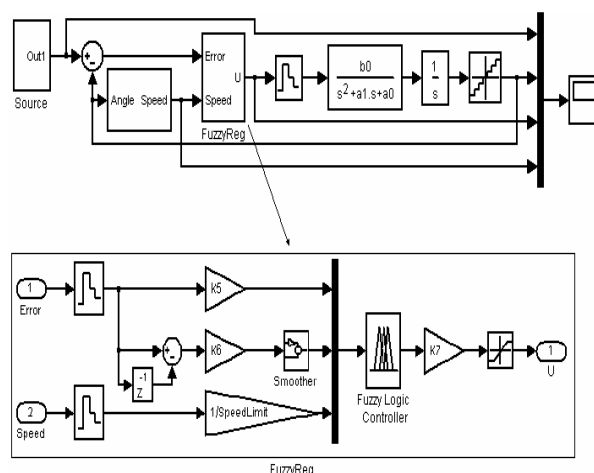


Рис. 5. Модель замкнутой системы регулирования положения с нечетким регулятором

На реальном объекте в качестве датчика обратной связи используется оптический инкрементальный датчик угла, а скорость вычисляется контроллером привода. Поэтому в модели применен тот же принцип: выходной сигнал угла с аналогового интегратора квантуется с шагом, равным цене деления оптического датчика. Значение скорости на k -м шаге вычисляется по формуле

$$v(k) = \frac{\alpha(k) - \alpha(k-1)}{T_d},$$

где v – скорость; α – угол, k – шаг дискретности, T_d – период дискретизации.

В блоке вычисления скорости также применено сглаживание сигнала усреднением за последние два отсчета.

Нечеткий регулятор реализован в блоке *FuzzyReg*. Этот блок имеет два входа, *Error* и *Speed*, куда подаются сигналы ошибки и вычисленной скорости объекта, и один выход U – сигнал управления. База правил и информация о термах хранится в блоке *Fuzzy Logic Controller*. Скорость ошибки вычисляется из сигнала ошибки по принципу, аналогичному вычислению скорости объекта.

Входные сигналы регулятора нормируются к диапазону от минус единицы до единицы с помощью коэффициентов $k5, k6, SpeedLimit$. Сигнал управления усиливается с помощью коэффициента $k7$. Коэффициент *SpeedLimit* равен величине, обратной значению максимально-допустимой скорости 10 град/с. Коэффициенты $k5, k6, k7$ были найдены методом численной оптимизации посредством функционального блока *Signal Constraint* из библиотеки *Simulink Design Optimization* пакета *Matlab* исходя из желаемых параметров переходного процесса. При настройке коэффициентов обратная связь по скорости объекта управления была отключена для упрощения системы.

Результаты моделирования и испытаний на лабораторном стенде. Моделирование системы регулирования положения с замкнутой обратной связью по скорости показало, что при достижении скоростью максимально-допустимых значений возникают высокие пульсации управления и скорости объекта (рис. 6, кривая 1). Испытания на лабораторном стенде, который представляет собой ОПУ с закрепленными на нем макетами оптического оборудования, подтвердили наличие пульсаций, проявляющихся в повышенном акустическом шуме ОПУ. Также ограничение скорости изменялось ступенчато по мере движения ОПУ, что не обеспечивает минимальное время выхода ОПУ в заданное положение. Корректировка коэффициентов k_5 , k_6 , k_7 не привела к положительному результату.

Анализ сигнала ошибки положения, сигнала скорости и сигнала управления показал, что ступенчатое изменение скорости происходит при переходе значения ошибки положения через значение 0,3 – границу переключения термов лингвистической переменной. Причиной пульсаций скорости и связанного с ними акустического шума в ОПУ, по всей видимости, является треугольная форма функций принадлежности для лингвистической переменной v . На основании этих выводов были скорректированы границы термов и функции принадлежности лингвистических переменных нечеткой структуры (рис. 2, б). Моделирование в пакете Matlab выявило заметное улучшение процессов в системе регулирования. На представленных графиках отсутствуют пульсации скорости и ступенчатое изменение скорости по мере уменьшения угловой ошибки (рис. 6, кривая 3). При последующих испытаниях на лабораторном стенде также отсутствовал акустический шум при движении ОПУ во всех режимах.

При испытании на стенде имитировалось также возмущающее воздействие. С 25-й секунды эксперимента (рис. 7) к валу ОПУ был приложен активный момент, действовавший в течение восьми секунд. Под действием этого момента вал отклонился от заданного значения более чем на 20 градусов. После окончания действия внешнего момента регулятор отработал ошибку и вернул ОПУ к заданному положению со скоростью, не превышающей максимально допустимого значения. Затем внешний момент был приложен в противоположном направлении и получен аналогичный результат.

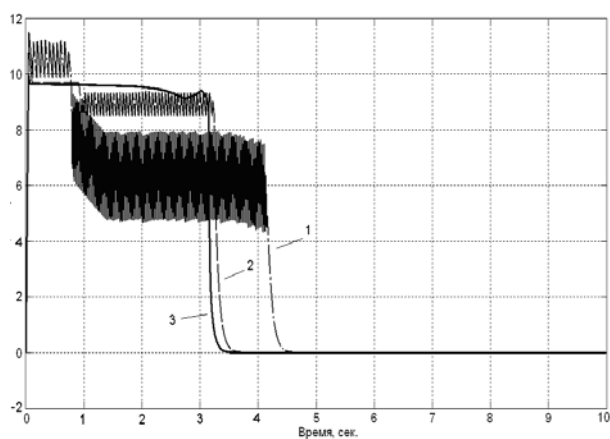


Рис. 6. Графики скорости для систем с разными настройками регуляторов: 1 – регулятор на рис. 2, а; 2 – регулятор с измененными термами для v ; 3 – регулятор на рис. 2, б

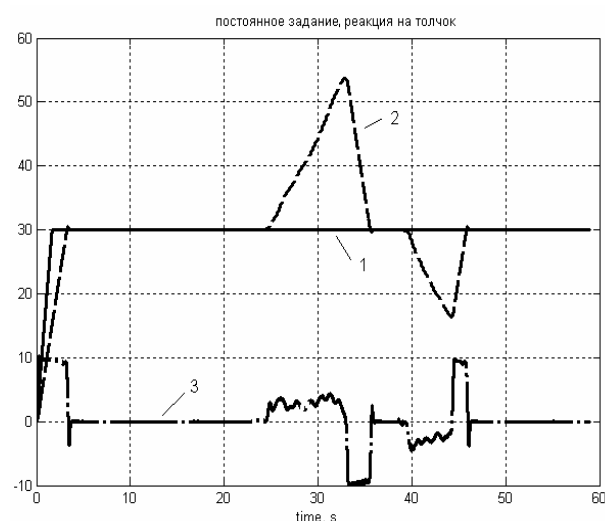


Рис. 7. Приведение системы в заданное положение: 1 – задание; 2 – угол; 3 – скорость

При том, что разработанный регулятор справляется в ограничением скорости поворота ОПУ, он обрабатывает и ошибку по положению, соответственно на него ложатся высокие точностные требования для прецизионного электропривода. Замкнутая нечеткая система регулирования обладает астатизмом первого порядка по заданию и нулевого порядка по возмущению. Ошибка, пропорциональная производной сигнала задания, может быть скомпенсирована с помощью принципов комбинированного управления. На основе полученной при моделировании зависимости ошибки положения от скорости изменения задания был рассчитан поправочный коэффициент:

$$K_{comp} = 10,28 \text{ } ^\circ\text{/с/град.}$$

При добавлении к сигналу задания своей первой производной с этим коэффициентом ошибка стремится к нулю. В отличие от модели, на лабораторном стенде присутствует момент сопротивления, вызванный трением в подшипниках и кабельным переходом, поэтому при реализации комбинированного управления с

рассчитанным коэффициентом на лабораторном стенде ошибка положения полностью не была скомпенсирована. Прежде всего на ошибку влияет отсутствие астатизма по возмущению. Максимальная угловая ошибка составила 27 угловых секунд. Скорректировав поправочный коэффициент для компенсации указанных факторов, удалось достичь среднеквадратичной ошибки (СКО) в 1,55 угловых секунд при коэффициенте 31 °/с/град.

При том, что система регулирования успешно справлялась с удержанием скорости поворота ОПУ в пределах 10 град/с, в режиме отработки постоянного сигнала задания СКО не превышала 30 угловых секунд. Её величина зависит от положения подвижной части ОПУ и момента сопротивления в этой точке. Данное значение СКО является неудовлетворительным для задач наведения оптических комплексов. Для уменьшения ошибки наведения было решено замкнуть внутренний контур тока с ПИ-регулятором, тем самым был повышен коэффициент передачи для сигнала управления нечеткого регулятора и увеличена чувствительность системы по ошибке положения. При этом не понадобилось перенастраивать коэффициенты регулятора, а СКО уменьшилась до единиц угловых секунд, что является удовлетворительным результатом.

Постоянная составляющая мгновенного значения ошибки зависит от момента сопротивления, что требует доработки нечеткого регулятора в части увеличения астатизма системы по возмущению.

Заключение

Разработанный нечеткий регулятор в системе следящего электропривода решает задачу ограничения скорости поворота опорно-поворотного устройства телескопа. По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Применение нечеткого регулятора позволяет эффективно ограничить скорость поворота ОПУ в системе регулирования положения.

2. Для уменьшения ошибки наведения в реальной системе требуется ввести внутренний контур тока. При этом система сохраняет устойчивость без перенастройки нечеткого регулятора положения, что свидетельствует об её робастности.

3. Разработанный регулятор может решать задачу ограничения скорости в реальном времени как при работе по сигналу задания, производная которого выше максимальной скорости движения привода, так и при демпфировании больших возмущающих воздействий извне, например чрезмерной ветровой нагрузке или неравномерности момента сопротивления механических частей ОПУ.

Нулевой астатизм по возмущению разработанной системы требует дальнейших исследований способов повышения порядка астатизма, например, посредством введения в регулятор дополнительного интегратора или использования комбинированного метода управления, где нечеткий регулятор ограничивает скорость поворота объекта, а слежение за ошибкой по положению осуществляется классическими методами управления, повышающими астатизм системы.

Список литературы

1. **Ловлин С.Ю., Цветкова М.Х., Жданов И.Н.** Программируемый формирователь траектории движения следящего электропривода // Научно-технический вестник СПбГУИТМО. – 2011. – № 72. – С. 113–117.
2. **Денисов К.М., Куприянчик Д.В.** Система управления электроприводом азимутальной оси телескопа с фаззи-регулятором. // Научно-технический вестник СПбГУИТМО. – 2005. – № 20. – С. 116–122.
3. **Горячев О.В., Шарапов М.А., Иванова Е.С.** Синтез нечеткого регулятора для управления приводом наведения и стабилизации с многомассовой механической подсистемой // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – №11. – С. 30–35.
4. **Леоненков А.В.** Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
5. **Арановский С.В.** Идентификация полюсов электромеханического объекта на основе сдвигов фаз // Информатика и системы управления. – 2011. – №1. – С. 97–107.
6. **Арановский С.В., Бардов В.М.** Метод идентификации параметров системы двигатель-двухмассовый механизм по измерениям выходной переменной // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – №5. – С. 15–18.

Усольцев Александр Анатольевич,
Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электромеханических систем,
e-mail: uaa@nwgsm.ru

Смирнов Никита Александрович,
Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
аспирант кафедры электротехники и электромеханических систем,
телефон 8 (909) 582-16-91,
e-mail: n.smirnov@ets.ifmo.ru