

УДК 629.12

Р.Д. Шигапов, В.Р. Крашенинников, А.В. Маттис

СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОРАБЕЛЬНОЙ ЛЕБЕДКОЙ

Шигапов Ринат Дамирович, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета. Инженер-программист 1 категории ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет статьи в области управления морскими подвижными объектами. [e-mail: shigap@hotmail.com].

Крашенинников Виктор Ростиславович, доктор технических наук, профессор, окончил Казанский государственный университет, заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» УлГТУ. Имеет работы по статистическим методам обработки сигналов и изображений. [e-mail: kvrulstu@mail.ru].

Маттис Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, окончил машиностроительный факультет УлГТУ по специальности «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств». Главный конструктор ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Имеет публикации в области моделирования и разработки АСУ. [e-mail: mars@mv.ru].

Аннотация

В настоящей работе представлена математическая модель системы, состоящей из корабельной лебедки и кабель-троса, соединяющего телеуправляемый подводный аппарат с надводным кораблем, и синтезирован нечеткий регулятор для управления корабельной лебедкой, обеспечивающий минимальное влияние кабель-троса на подводный аппарат.

Математическая модель кабель-троса представлена системой N шарнирно-соединенных стержней (звеньев), при этом длина первого звена и количество звеньев могут уменьшаться со временем. Для моделирования корабельной лебедки использована упрощенная математическая модель.

Даются рекомендации по определению функций принадлежности входных и выходной переменных создаваемого регулятора и по синтезу его базы правил. Для нечеткого логического вывода применяется алгоритм Мамдани. При задании функций принадлежности и синтезе правил управления учитываются ограничения по прочности кабель-троса и инерционность барабана лебедки. Приведены результаты сравнения моделей ПД (пропорционально-дифференциального) и нечеткого регуляторов.

Разработана программа для ЭВМ, которая моделирует работу лебедки и системы управления ею в составе комплекса «надводный корабль–кабель-трос–подводный аппарат». Для идентификации лебедки использованы реальные характеристики лебедки СВЛ-4, выпускаемой инженерной фирмой «Симбия». Для реализации процесса нечеткого моделирования использованы средства математического пакета программ MathWorks MatLab, в том числе специальный пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox.

Ключевые слова: кабель-трос, корабельная лебедка, нечеткий регулятор.

SYNTHESIS OF A FUZZY CONTROLLER FOR CONTROL OF SHIP HOIST

Rinat Damirovich Shigapov, graduated from the Radio Engineering Department of Ulyanovsk State Technical University; a software engineer of Federal Research-and-Production Center Open Joint-Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; research interests include management of marine mobile objects. e-mail: shigap@hotmail.com.

Viktor Rostislavovich Krasheninnikov, Doctor of Engineering, Professor, graduated from Kazan State University, Head of the Department of Applied Mathematics and Computer Sciences at Ulyanovsk State Technical University; research interests include statistical methods of signal and image processing. e-mail: kvrulstu@mail.ru.

Aleksey Valeryevich Mattis, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Machine-Building at Ulyanovsk State Technical University; his major is 'Technology, Equipment and Automation of Machine-Building Productions'; Deputy Chief Designer at FRPC OJSC 'RPA 'Mars'; an author of publications in the field of modelling and development of C2 systems. e-mail: mars@mv.ru.

Abstract

The present paper deals with a mathematical model of the system which is comprised of a ship hoist and a cable connecting the remotely controlled underwater vehicle with a surface ship; a fuzzy controller is synthesized to control the ship hoist allowing the minimum impact of the cable to the underwater vehicle.

The mathematical model of the cable is represented by the N-system of the hinged rails (links); at this, the length of the first link and the link number allow their reduction over time. To model the ship hoist, a simplified model is applied.

Recommendations are made to determine the membership functions for input and output variables of the developed controller, and to synthesize its rule database. The Mamdani algorithm is employed for the fuzzy logic output. When setting the membership functions and synthesizing the control rules, the restrictions for the cable strength and hoist persistence are taken into account. The paper gives the results of comparison of the 'proportional-differential' model with the fuzzy controllers.

A computer program is developed where the performance of the hoist and control system within the 'surface ship – cable – underwater vehicle' system is simulated. To identify the hoist, we have used the actual features of SVL-4 hoist which is 'Simbiya' company produced. To implement the fuzzy modeling process, we have employed tools from MathWorks MatLab mathematical software package including Fuzzy Logic Toolbox, a specialized bump pack.

Key words: cable, ship hoist, fuzzy controller.

ВВЕДЕНИЕ

Необитаемые подводные аппараты (НПА) сегодня широко применяются во многих сферах, связанных с освоением Мирового океана, например, при исследовании морского дна, нефтегазовых поисковых работах, спасательных операциях и т. д. Надводный корабль (НК) связан с НПА кабель-тросом (КТ). Для эффективной работы на больших глубинах и при обследовании протяженных объектов, в том числе в режимах совместного с кораблем движения, необходимо поддержание формы КТ, при которой его влияние на управляемость НПА близко к минимальному. Проведенные ранее исследования показали, что это минимальное влияние получается при длине КТ, примерно в 4 раза больше глубины погружения НПА. Поэтому будем считать, что задана требуемая длина L_3 , а система управления лебедкой должна ее обеспечивать. В известных системах управления [1] эта задача, как правило, реализуется с помощью ПД-регулятора вида:

$$u(t) = K \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right),$$

где $u(t)$ – управляющее воздействие;

K – коэффициент усиления регулятора;

$e(t) = L_3 - L(t)$ – отклонение заданной длины (L_3) от текущей ($L(t)$);

T_d – постоянная времени дифференцирования регулятора.

Однако применение ПД-регуляторов связано с определенными недостатками, в том числе, с отсутствием явной взаимосвязи между коэффициентами ПД-регулятора и факторами окружающей среды. В связи с чем, оператору системы управления сложно самостоятельно проводить настройку регулятора. Кроме того, в структуре ПД-регулятора не заложены ограничения на допускаемые (предельные) значения входных и выходных переменных.

Для устранения указанных недостатков целесообразно разработать математическую модель системы, состоя-

щей из корабельной лебедки и КТ, соединяющего НПА с НК, и синтезировать нечеткий регулятор для управления корабельной лебедкой, обеспечивающий минимальное влияние КТ на НПА и позволяющий оператору проводить настройку регулятора заданием базы правил на формальном языке.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОРАБЕЛЬНОЙ ЛЕБЕДКИ И КТ

Для управления вытравливанием (выпуском) и выбором (вытягиванием) КТ обычно используется конструкция корабельной лебедки [1], схема которой приведена на рисунке 1.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: R_L – радиус барабана лебедки; $V(t)$ – скорость движения верхней части КТ; $T_{KT}(t)$ – вектор натяжения КТ со стороны НК.

Запишем уравнения вращения барабана лебедки в скалярном виде:

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = \frac{U(t) + R_L T_{KT}(t)}{J}, \\ \omega(t) = \int_{t_0}^t \varepsilon(t) dt, \quad \varphi(t) = \int_{t_0}^t \omega(t) dt \end{cases} \quad (1)$$

где $U(t)$ – проекция момента силы, создаваемой действием крутящего момента электродвигателя лебедки на ось лебедки;

$\varphi(t)$ – угол поворота барабана лебедки;

$\omega(t)$ – угловая скорость вращения барабана лебедки;

$\varepsilon(t)$ – угловое ускорение вращения барабана лебедки;

J – момент инерции барабана лебедки;

t_0 – начальный момент времени.

При составлении системы уравнений (1) приняты следующие допущения:

- значение момента инерции не зависит от изменения радиуса барабана лебедки при наматывании или разматывании на него КТ;

- механическая характеристика электродвигателя не учитывается в уравнениях движения лебедки.

Скорость движения верхней части КТ находится следующим образом:

$$V(t) = R_{л} \omega(t). \quad (2)$$

Модели и алгоритмы для определения $T_{КТ}(t)$ приведены, например, в [2–4]. В [2, 3] КТ представляется как гибкая растяжимая нить и сила натяжения вследствие растяжения кабеля находится по закону упругости. При численном решении уравнений движения КТ он разбивается на звенья одинаковой длины, для каждого из которых находятся значения натяжения.

В настоящей работе для определения $T_{КТ}(t)$ будем использовать уравнения из [2]. При этом будем рассматривать звенья как нити, которые в ходе моделирования могут менять свою длину.

Будем считать, что при изменении длины КТ изменяется длина только одного звена, соединяющего КТ с НК (звено P_1P_2 на рисунке 2), при этом длина остальных звеньев не меняется. В том случае, когда КТ вытравливается, длина звена P_1P_2 увеличивается, а когда выбирается – уменьшается. Скорость изменения длины этого звена зависит от скорости вращения барабана лебедки. При возникновении большой скорости вращения барабана лебедки резко возрастают натяжения звеньев КТ, что приводит к большим скоростям и перемещениям его точек. У реального КТ таких явлений не бывает. Поэтому вводится регуляция дискрета по времени; если на очередном шаге длина какого-либо звена кабеля изменилась значительно, то дискрет для этого шага уменьшается в два раза до тех пор, пока изменение длины не окажется в указанных пределах.

Чаще всего лебедка включается при режимах погружения или всплытия НПА, при этом выбирается или вытравливается значительная длина КТ. В подобных ситуациях длина КТ меняется настолько сильно, что изменение длины первого звена оказывается недопустимо большим. Поэтому для первого звена устанавливаются минимальное и максимальное значения длины. При выборке КТ и достижении минимального значения длины первого звена оно присоединяется ко второму, которое в результате

становится первым. В итоге из расчетной схемы исключается одно звено, а остальные звенья остаются на своих позициях, структура решения не нарушается. Этот прием возможен при небольшой кривизне КТ, в противном случае возникают большие погрешности расположения узлов КТ и, как следствие, скачки натяжений, поэтому модель КТ становится неустойчивой. При вытравливании КТ, наоборот, длина первого звена может оказаться слишком большой. Поэтому, когда длина первого звена становится вдвое больше начальной длины, оно делится пополам на два звена, и в схему решения добавляется дополнительный узел, в результате чего общая структура решения не нарушается.

Алгоритм управления корабельной лебедкой

На рисунке 3 представлена структурная схема предлагаемой нечеткой системы автоматического управления (САУ) корабельной лебедкой.

Перед регулятором ставится задача поддержания требуемой длины вытравленной части КТ, которая обеспечивает минимальное его натяжение, то есть минимальное воздействие на НПА. Для этого в каждый момент времени в сравнивающем устройстве вычисляется разница между текущим и требуемым значениями длины. Полученная разница ($e(t) = L_3 - L(t)$) и скорость $V(t)$ верхнего конца КТ поступают на вход нечеткого регулятора. Обозначим входные переменные как e и V , соответственно, а выходную переменную как U . Заданная длина КТ зависит от режима совместного движения НК и НПА, гидрометеорологических условий, наличия подводных течений и других факторов. В настоящей работе предполагается, что заданная длина КТ постоянна. Тем не менее, полученные в работе результаты достаточно легко распространить и на случай переменного значения требуемой длины КТ.

Нечеткий регулятор работает по следующей стандартной схеме [5, 6].

Фаззификация (приведение к нечеткости). Для осуществления фаззификации диапазон входных и выходных переменных разбивается на подмножества. В рамках данных подмножеств строятся функции принадлежности переменных этим подмножествам. Для описания входной

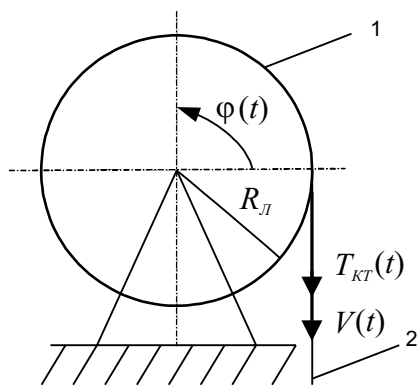


Рис. 1. Функциональная схема корабельной лебедки: 1 – барабан; 2 – КТ

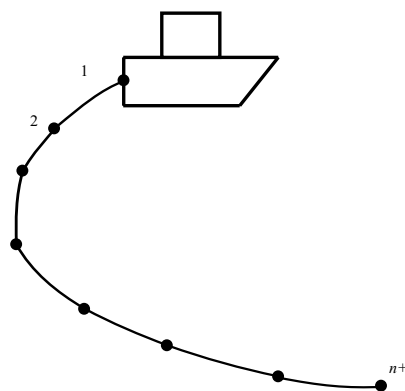


Рис. 2. Дискретная схема КТ

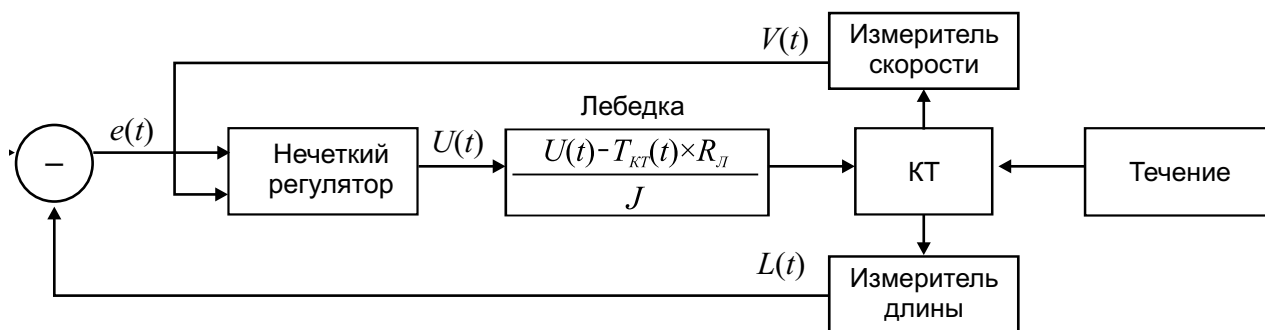


Рис. 3. Структурная схема нечеткой САУ длиной КТ

переменной e разделим диапазон ее значений на пять подмножеств: NL – отрицательный большой (Negative Large); NS – отрицательный малый (Negative Small); Z – около нуля (Zero); PS – положительный малый (Positive Small); PL – положительный большой (Positive Large). Для описания входной переменной V разделим диапазон ее значений на три подмножества: N – отрицательный (Negative); Z – около нуля (Zero); P – положительный (Positive). Для задания функций принадлежности переменной e используем гауссову форму функций (рис. 4а), а для V используем z-образную, s-образную и гауссову формы (рис. 4б). Для описания выходной переменной U используем пять подмножеств: NL, NS, Z, PS и PL с гауссовой функцией принадлежности (рис. 4в). Для переменных выбраны гауссовы функции принадлежности, так как они отличаются гладкостью и простотой записи и являются наиболее используемыми при описании нечетких множеств. После разбиения значений переменных на подмножества определяются степени принадлежности входных данных к каждому входному подмножеству.

Агрегирование (определение степени истинности условий). Для агрегирования необходимо составить набор нечетких правил, на основании которых осуществляется нечеткий вывод. Данные правила создаются на основе опыта эксперта, который выражает на формальном языке возможные комбинации переменных управления. Для нечеткого вывода используем нечеткую модель типа Мамдани [7], где каждое правило представляет собой выражение следующего типа:

ЕСЛИ «e есть x» И «V есть y», ТО «U есть z».

Здесь x, y обозначают подмножества входных переменных, z – подмножество выходной переменной. Порядок базы правил зависит от количества подмножеств входных переменных. Если количество подмножеств переменных e и V обозначить n_1 и n_2 соответственно, то максимальное количество правил равно $n = n_1 \cdot n_2$ (в нашем случае $n = 5 \cdot 3 = 15$). Для управления длиной КТ составим набор правил (табл. 1). При этом каждое правило указывает, как нужно изменить управляющий момент в зависимости от наблюдаемых входных величин. При отрицательной скорости V верхнего конца КТ барабан лебедки «выбирает» КТ, а при положительной скорости – «вытравляет». При отрицательных значениях управляющего момента и

положительной скорости V барабан лебедки «вытравляет» КТ, но тормозится. При положительных значениях управляющего момента и положительной скорости V барабан «вытравляет» КТ с возрастающей скоростью. При положительных значениях управляющего момента и отрицательной скорости V барабан лебедки «выбирает» КТ, но тормозится.

Приведем объяснение нескольких правил из таблицы 1:

- NL – N – NS: если e отрицательная и большая (длина КТ намного больше требуемой), а V отрицательная (КТ выбирается), то следует ускорить выработку КТ средним усилием (управляющий момент U отрицательный средний);

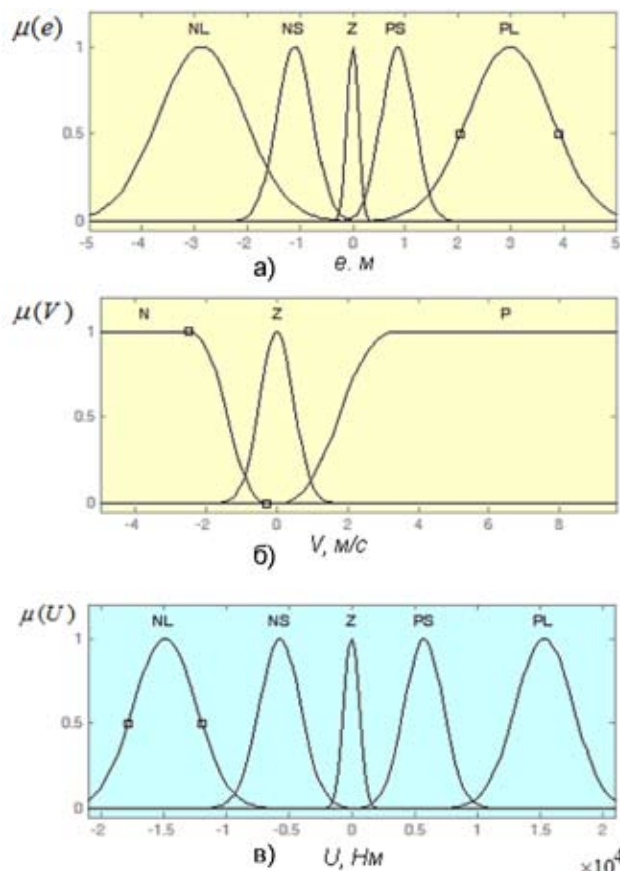


Рис. 4. Функции принадлежности лингвистических переменных: а) разница длины e ; б) скорость V верхнего конца КТ; в) управляющий момент U

Таблица 1

База правил нечеткого регулятора

e	V	U
NL	N	NS
NL	Z	NL
NL	P	NL
NS	N	Z
NS	Z	NS
NS	P	NL
Z	N	PS
Z	Z	Z
Z	P	NS
PS	N	PS
PS	Z	PS
PS	P	Z
PL	N	PL
PL	Z	PL
PL	P	PS

- NL-Z-NL: если e отрицательная и большая, а V около нуля (барабан лебедки не вращается), то следует ускорить выбиравание КТ большим усилием (управляющий момент U отрицательный большой);

- PS-P-Z: если e положительная и средняя, а V положительная (КТ вытравляется), то ничего не делать (управляющий момент U около нуля);

- PL-P-PS: если e положительная и большая, а V положительная (КТ вытравляется), то следует ускорить вытравливание КТ средним усилием (управляющий момент U положительный средний).

Зная степени принадлежности входных переменных, находим степени истинности условий каждого правила, используя метод минимума (из двух значений степеней принадлежности входных переменных определяется минимальное – это и является степенью истинности правила).

Активизация (нахождение степени истинности каждого из подзаключений). Так как мы управляем одной переменной, то степень истинности каждого подзаключения равна степени истинности правила, к которому принадлежит это подзаключение.

Аккумуляция (нахождение функций принадлежности для каждой из выходных переменных). Функция принадлежности для управляемой переменной, управляющий момент находится объединением полученных функций принадлежности.

Дефаззификация (нахождение четкого значения для выходной переменной). При дефаззификации используется метод центра тяжести. На выходе регулятора получается четкое значение управляющего момента U .

Для исследования описанной системы управления была разработана программа для ЭВМ, в которой для сравнения моделируется система управления на основе ПД-регулятора и на основе нечеткого регулятора. Будем считать, что НК и НПА движутся совместно, прямолинейно, равномерно и с одинаковой скоростью. Алгоритмы движения и управления НПА описаны в [8–10]. Модель движения КТ использована из [2]. Морское течение в процессе моделирования считалось неравномерным [11]: $W_x(t) = W_z(t) = 2 \cdot \sin(0,8t)$, где $W_x(t)$, $W_z(t)$ – проекции вектора скорости течения на оси системы координат, связанной с НК.

При моделировании использованы характеристики реальной лебедки СВЛ-4, выпускаемой инженерной фирмой «Симбия»: максимальная длина КТ = 2600 м, максимальная скорость вытравливания = 9,6 м/с, максимальная скорость выбиравания = 5 м/с, максимальное усилие лебедки = 21000 Н – и используется кабель КГ 1 (диаметр 11,4 мм) [12]. Пусть начальная длина КТ – 100 м, глубина погружения НПА – 26 м, заданная длина кабеля – 98 м.

Программа моделирует процесс движения с дискретом по времени 0,01 с.

Приведем некоторые входные и выходные данные на нечетком регуляторе: если разница $e = -3,58$ м (значение текущей длины КТ больше значения наилучшей длины) и скорость барабана $V = 2,3$ м/с (КТ вытравляется), то $U = -3555$ Нм (то «выбирать» КТ); если $e = 1,74$ м (значение текущей длины КТ меньше значения наилучшей длины) и скорость $V = -2,28$ м/с (КТ «выбирается»), то $U = 2455$ Нм (то «вытравлять» КТ).

Моделирование нечеткой системы управления проводилось с использованием пакета MathWorks MatLab, в том числе специального пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox [13]. На рисунке 5 представлен график зависимости длины КТ от времени при управлении ПД-регулятором и при управлении нечетким регулятором.

Эти графики показывают, что при применении нечеткого регулятора $L(t)$ быстрее стабилизируется у заданно-

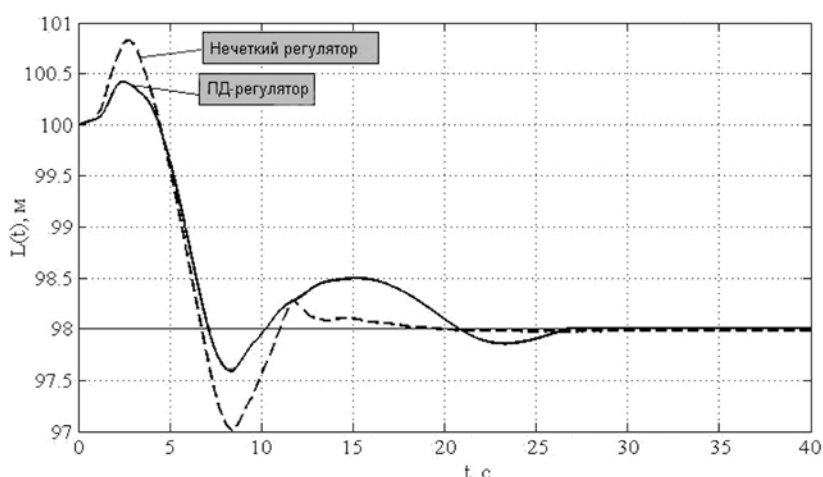


Рис. 5. Графики зависимости заданной и текущей длины КТ от времени при ПД - управлении лебедкой и при нечетком управлении лебедкой

го значения, чем при применении ПД-регулятора (нечеткий регулятор стабилизирует процесс управления за 20 с, ПД-регулятор – за 27 с). Но при этом перерегулирование процесса управления при использовании ПД-регулятора меньше (примерно на 0,7 м).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена нечеткая система управления длиной КТ. Проведенное моделирование с приведенными выше параметрами показало, что синтезированный нечеткий регулятор стабилизирует длину КТ у заданного значения немного быстрее, чем классический ПД-регулятор (на 7 секунд), но при этом перерегулирование процесса управления при использовании ПД-регулятора меньше примерно на 0,7 м. Похожие результаты были получены и при других режимах совместного движения НК и НПА. Эти результаты показывают, что нечеткий регулятор управляет длиной КТ не хуже чем ПД-регулятор. Однако, настройка коэффициентов ПД-регулятора является трудоемкой операцией, а настройка нечеткого регулятора более проста, так как основана на понятных правилах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В. Система управления глубиной погружения буксируемых объектов. – Владивосток : Дальнаука, 2005. – 285 с.
2. Крашенинников В.Р., Шигапов Р.Д. Модель движения кабель-троса, связывающего надводный носитель и необитаемый подводный аппарат // Автоматизация процессов управления. – 2013. – № 1 (31). – С. 80–85.
3. Крашенинников В.Р. Численное решение уравнений движения подводного буксировочного кабеля // Прикладная математика и механика : сб. науч. тр. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – Вып. 8. – С. 150–159.
4. Крашенинников В.Р., Шигапов Р.Д. Выбор длины звена при моделировании движения кабель-троса, соединяющего надводный носитель и необитаемый подводный аппарат // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики : матер. 3-й науч.-практ. интернет-конф., 20–21 февраля 2014 г. – Ульяновск : SIMJET, 2014. – С. 237–241.
5. Шигапов Р.Д. Синтез нечеткого регулятора для управления корабельной лебедкой // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: тр. седьмой всерос. науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ), г. Ульяновск, 22–23 сентября 2011 г. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – С. 127–130.
6. Шигапов Р.Д. Синтез правил нечеткого регулятора для управления корабельной лебедкой // Радиоэлектронная техника : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – С. 199–202.
7. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М. : БИНОМ. Лаборатория знания, 2009. – 798 с.
8. Шигапов Р.Д. Приведение к цели необитаемого подводного аппарата, связанного с кораблем кабель-тросом // Прикладная математика и механика : сб. науч. тр. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – С. 489–493.

9. Крашенинников В.Р., Шигапов Р.Д. Моделирование управления движением подводного аппарата, связанного с надводным кораблем // Труды российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Сер.: Цифровая обработка сигналов и ее применение, вып. XII-1, 12-я международная конференция. – М. : Радиотехника, 2010. – С. 288–291.

10. Шигапов Р.Д. Управление автономным необитаемым подводным аппаратом // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем : тр. 6-й всерос. науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ), г. Ульяновск, 22–23 сентября 2009 г. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 133–135.

11. Шигапов Р.Д. Обучение нейро-нечеткой системы управления характеристикам заданной системы управления движением необитаемого подводного аппарата // Автоматизация процессов управления. – 2012. – № 2 (28). – С. 44–48.

12. Кабельная лебедка СВЛ // Инженерная фирма 'Симбия'. 1990 – 2014. – URL: <http://www.simbia.ru/ru/page.php?eq=trawls&id=swl4>. (Дата обращения: 12.04.2014).

13. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

REFERENCES

1. Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Chupina K.V. *Sistema upravleniya glubinoj pogruzheniya buksiruyemykh obyektov* [Towed Vehicles' Immersion Depth Control Systems]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2005. 285 p.
2. Krasheninnikov V.R., Shigapov R.D. *Model dvizheniya kabel-trosa, svyazyvayushchego nadvodnyy nositel i neobitayemyy podvodnyy apparat* [The model for Movement of Cable Connecting Carrying Ship with Unmanned Underwater Vehicle]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2013, no. 1, (31), pp. 80–85.
3. Krasheninnikov V.R. *Chislennoye resheniye uravneniy dvizheniya podvodnogo buksirovochnogo kabelya* [Numerical Solution of Motion of Underwater Cable]. *Prikladnaya matematika i mekhanika: sb. nauch. tr.* [Applied Mathematics and Mechanics: collection of scientific papers]. Ulyanovsk, UlSTU Publ., 2009, Issue 8, pp. 150–159.
4. Krasheninnikov V.R., Shigapov R.D. *Vybor dliny zvena pri modelirovani dvizheniya kabel-trosa, soyedinyayushchego nadvodnyy nositel i neobitayemyy podvodnyy apparat* [Selection of the Link Length when Modeling Motion of the Cable Connecting a Surface Ship with an Unmanned Underwater Vehicle]. *Mezhdistsiplinnyye issledovaniya v oblasti matematicheskogo modelirovaniya i informatiki : mater. 3-y nauch.-prakt. internet-konf.* [Interdisciplinary Research in the field of Mathematical Modeling and Informatics: Proceedings of the 3rd Theoretical and Practical Internet Conference, February 20–21, 2014]. Ulyanovsk, SIMJET Publ., 2014, pp. 237–241.
5. Shigapov R.D. *Sintez nechetkogo regulyatora dlya upravleniya korabelnoy lebedkoy* [Synthesis of Fuzzy Controller to Control of Ship Hoist]. *Sovremennyye problemy*

sozdaniya i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh sistem: tr. sedmoy vseros. nauch.-prakt. konf. (s uchastiyem stran SNG) [Actual Problems of Radio-Engineering Systems Development and Operation: Proceedings of the 7th Russian Theoretical and Practical Conference (with the participation of CIS countries), Ulyanovsk, September 22–23, 2011]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2011, pp. 127–130.

6. Shigapov R.D. Sintez pravil nechetskogo regulyatora dlya upravleniya korabelnoy lebedkoy [Synthesis of Rules of Fuzzy Controller to Control Ship Hoist]. *Radioelektronnaya tekhnika: mezhvuz. sb. nauch. tr., pod red. V.A. Sergeeva* [Radio Electronic Engineering: interuniversity collection of scientific papers under the Editorship of V.A. Sergeev]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2011, pp. 199–202.

7. Piegat A. *Nechetskoye modelirovaniye i upravleniye: per. s angl.* [Fuzzy Modeling and Control: Translation from English]. Moscow, BINOM Laboratoriya znaniya Publ., 2009. 798 p.

8. Shigapov R.D. Privedeniye k tseli neobitayemogo podvodnogo apparata, svyazannogo s korablen kabel-trosom [Targeting of an Unmanned Underwater Vehicle Connected to Ship via Cable]. *Prikladnaya matematika i mekhanika: sb. nauch. tr.* [Applied Mathematics and Mechanics: collection of scientific papers]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2011, pp. 489–493.

9. Krashennnikov V.R., Shigapov R.D. Modelirovaniye upravleniya dvizheniyem podvodnogo apparata, svyazannogo s nadvodnym korablen [Modeling of Motion Control of Underwater Vehicle]. *Trudy rossiyskogo nauchno-tekhnicheskogo obshchestva radiotekhniki, elektroniki i svyazi imeni A.S. Popova, Ser.: Tsifrovaya obrabotka signalov b yeye primeneniye, vyp. XII-1, 12-aja Mezhdunarodnaya*

konferentsiya [Proceedings of the Russian Scientific and Technical Society of Radio Electronics and Communications named after Popov A.S., Series of Digital Signal Processing and Application, Issue XII-1, 12th International Conference]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, pp. 288–291.

10. Shigapov R.D. Upravleniye avtonomnym neobitayemym podvodnym apparatom [Autonomous Unmanned Underwater Vehicle Control]. *Sovremennyye problemy sozdaniya i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh sistem: tr. 6-y vseros. nauch.-prakt. konf. (s uchastiyem stran SNG) Ulyanovsk, 22–23 Sentyabrya 2009* [Actual Problems of Radio-Engineering Systems Development and Operation: Proceedings of the 6th Russian Theoretical and Practical Conference (with the participation of CIS countries). Ulyanovsk, September 22–23, 2009]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2009, pp. 133–135.

11. Shigapov R.D. Obucheniye neyro-nechetkoy sistemy upravleniya kharakteristikam zadannoy sistemy upravleniya dvizheniyem neobitayemogo podvodnogo apparata [Training of Neuro-Fuzzy Control System to Characteristics of a Given Control System for Unmanned Underwater Vehicle Movement]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2012, no. 2 (28), pp. 44–48.

12. Kabelnaya lebedka SVL [SVL Ship Hoist]. Inzhenernaya firma 'Simbiya' [Simbiya Engineering Company], 1990 – 2014. Available at: <http://www.simbiya.ru/ru/page.php?eq=trawls&id=swl4>. (accessed: 12.04.2014).

13. Leonenkov A.V. *Nechetskoye modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy Modeling within MATLAB and fuzzyTECH Environment]. Sankt-Peterburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005. 736 p.