

На правах рукописи



Шигапов Ринат Дамирович

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНОГО  
АППАРАТА, СВЯЗАННОГО КАБЕЛЬ-ТРОСОМ  
С КОРАБЛЕМ**

Специальности:

05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем  
управления»,

05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и ком-  
плексы программ»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ульяновск – 2014

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика и информатика» Ульяновского государственного технического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»  
Крашенинников Виктор Ростиславович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Телекоммуникационные технологии и системы» ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный университет»  
Смагин Аркадий Алексеевич,  
кандидат технических наук, инженер-программист ООО «СЕНСЕ», г. Ульяновск,  
Гурман Дмитрий Александрович

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения».

Защита диссертации состоится 29 декабря 2014 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного технического университета.

Автореферат разослан «    »                      2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор  Смирнов Виталий Иванович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Необитаемые подводные аппараты (НПА) широко применяются во многих сферах, связанных с освоением Мирового океана, например, при исследовании морского дна, нефтегазовых поисковых работах, спасательных операциях и т. д. Для производства ряда подводных работ более эффективными считаются НПА, связанные с надводным кораблем (НК) кабелем или кабель-тросом (КТ): телеуправляемые, буксируемые или привязные аппараты. Такие НПА получают по кабелю непрерывное электроснабжение и сигналы управления с НК, что увеличивает рабочую глубину и время подводных работ в отличие от автономных аппаратов. По КТ на НК поступает информация об исследуемом объекте. Однако КТ воздействует на НПА, то есть возникает комплекс НК-КТ-НПА, поэтому дополнительно должны определяться и учитываться форма КТ и его распределённые натяжения не только в текущий момент времени, но и с упреждением для исключения возможности аварийных ситуаций. Кроме того, появляется необходимость управления корабельной лебёдкой, выбирающей или стравливающей КТ. Всё это существенно усложняет систему автоматического управления движением (САУД).

Важными элементами САУД являются различные регуляторы, преобразующие сигналы различных датчиков в сигналы управления, например, широко используемые пропорционально-дифференциальные (ПД) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД). Однако настройка (задание коэффициентов) этих регуляторов сложная задача, особенно в постоянно изменяющихся условиях (в нашем случае это длина КТ, положение и скорость НПА относительно НК, скорость течения воды и т.д.). Значительно проще осуществляется настройка нечётких регуляторов, представляющих собой систему правил естественной структуры «если-то». Однако применение таких регуляторов для комплекса НК-КТ-НПА в совокупности с лебёдкой не рассматривалось. Существенно, что при настройке в качестве учителя может быть оператор или имеющийся регулятор, что позволяет использовать имеющиеся решения в области автоматического управления.

При наличии КТ в управляемой системе необходима его математическая модель, позволяющая эффективно рассчитывать форму и натяжения. Для исследования движения КТ применяются модели в виде нерастяжимой или растяжимой гибкой или упругой нити. Для решения систем уравнений данных моделей прибегают к численным методам, так как аналитически решения находятся только в немногих частных случаях. При использовании модели КТ в виде нерастяжимой гибкой нити приходится выполнять условия нерастяжимости КТ, что усложняет решение и приводит к увеличению времени вычислений. Поэтому есть необходимость в разработке моделей движения КТ с менее затратной численной реализацией.

Таким образом, существует необходимость поиска новых моделей движения КТ и регуляторов для управления связкой НК-КТ-НПА. Следовательно, задача математического моделирования движения этой системы и создания легконастраиваемых регуляторов для управления ею, рассматриваемая в диссертации, является актуальной.

**Цели и задачи работы.** Целью работы является повышение эффективности проводимых подводных работ и исследований, проводимых с помощью комплексов НК-КТ-НПА, за счёт использования новой модели движения КТ и обучаемых нечётких регуляторов в системе управления корабельной лебёдкой и движением НПА.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи.

1. Обзор и анализ существующих математических моделей движения и управления КТ и НПА.

2. Разработка математической модели движения КТ, учитывающей его физическое свойство – растяжимость.

3. Разработка нечётких регуляторов для управления корабельной лебедкой КТ и управления НПА в комплексе НК-КТ-НПА, воспроизводящих заданный эталонный регулятор.

4. Разработка комплекса программ для исследования и практической реализации управления движением корабельной лебедкой и НПА.

**Методы исследований.** Для решения поставленных в работе задач использовались методы математического моделирования, теории управления, нечеткой логики и численного решения дифференциальных уравнений. При разработке комплекса программ применялись методы объектно-ориентированного программирования и методы математического моделирования в среде MatLab.

#### **Научная новизна основных результатов, выносимых на защиту**

1. Получена новая математическая и компьютерная модель движения КТ, связывающего НК и НПА, учитывающая его физическое свойство – растяжимость. Эта модель позволяет эффективно определять форму и натяжение КТ в системах управления движением КТ и НПА.

2. Разработан нечеткий регулятор как элемент системы управления корабельной лебедкой, выбирающей или стравливающей КТ. Сравнение нечеткого и ПД регуляторов показывает, что при применении нечеткого регулятора длина КТ быстрее стабилизируется у заданного значения, чем при применении ПД-регулятора.

3. Показано, что использование разработанного нейронечеткого регулятора в системе управления курсом НПА даёт возможность повышения эффективности управления в процессе увеличения объема обучающей выборки.

4. Разработан комплекс программ на языке C# с использованием среды разработки Visual Studio 2010 и математического пакета программ MatLab, позволяющий проводить исследования и практические реализации алгоритмов поиска оптимальных конфигураций КТ и управления движением корабельной лебедкой и НПА. Испытания комплекса показали, что он может быть использован в режиме реального времени.

**Практическая ценность.** Разработанный программный комплекс, предоставляет разработчикам САУ возможность исследования и настройки системы управления движением лебедки и НПА в различных режимах движения. В приложении к диссертации имеется акт об использовании результатов диссертационной работы в производственной деятельности ФНПЦ ОАО «НПО «Марс», г. Ульяновск.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих НТК:

- Шестая Всероссийская научно-практическая конференция (с участием стран СНГ) (Ульяновск, УлГТУ, 2009 г.);
- Седьмая Всероссийская научно-практическая конференция (с участием стран СНГ) (Ульяновск, УлГТУ, 2011 г.);
- XII Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2012 г.);
- Третья научно-практическая internet-конференция; «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики» (Ульяновск, 2014 г.)
- Ежегодные конференции профессорско-преподавательского состава Ульяновского государственного технического университета (2009-2014 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе, 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, и одна зарегистрированная программа для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, перечня основных аббревиатур и двух приложений. Работа содержит 116 страниц текста, 45 рисунков и 3 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, указывается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводится краткое содержание и структура диссертации.

**В первой главе** проводится анализ существующих вариантов математического и компьютерного описания движения КТ и НПА, существующих алгоритмов управления и методов синтеза систем управления. Рассмотрены методы решения математических уравнений движения КТ и НПА. Показано, что существующие математические модели движения КТ и НПА обладают рядом недостатков.

В литературе обычно встречается два типа математических моделей КТ: представленная системой с распределенными параметрами или в виде дискретной модели (КТ разделяется на стержни). Часто при описании КТ системой уравнений с распределенными параметрами, он представляется как нерастяжимая гибкая нить. Аналитические решения данных систем удаётся найти только в немногих частных случаях (при определенных начальных и граничных условиях). Поэтому используются численные методы решения. Схемы решения получаются сложными с возможными вырождениями из-за вхождения в уравнения производной от натяжения, а также из-за необходимости соблюдать условие нерастяжимости нити. При описании КТ в виде дискретной модели часто используется аппроксимация в виде абсолютно твердых стержней, соединенных между собой шарнирами. Такое представление позволяет получить уравнения динамики КТ в виде систем нелинейных однородных дифференциальных уравнений, которые решаются более простыми методами, но остаётся необходимость соблюдать нерастяжимость стержней.

В литературе имеется мало информация о принципах создания САУ НПА, связанных с НК кабелем. В то же время имеются публикации по созданию САУ БПА и САУ АНПА. Одним из основных элементов САУ ПА является регулятор управления. Наиболее распространенным в управлении морскими объектами является ПИД-регулятор. Однако у ПИД-регуляторов есть ряд существенных недостатков: линейность и вследствие этого невысокая эффективность ПИД-регуляторов при нелинейных режимах движения НПА; малое количество настраиваемых параметров; чувствительность к точности измерений параметров объекта управления; при появлении ошибок измерений ПИД-регуляторы не всегда способны их отфильтровать. Еще одним недостатком ПИД-регуляторов является невозможность подстраиваться к изменяющимся внешним условиям. Данный недостаток отсутствует в адаптивных системах, которые могут быть самонастраивающимися или самоорганизующимися. Недостатком таких систем является необходимость ввода в САУ дополнительного элемента – эталонной модели или необходимости решения сложных задач идентификации в текущем времени параметров математической модели объекта управления и возмущений. Среди адаптивных систем управления можно выделить современные САУ. Эти системы используют в своей основе новые тенденции в теории управления, такие как использование синергетики, нейронных сетей, нечетких систем для создания нелинейных систем управления. Применение нейронных сетей для построения систем управления имеет ряд преимуществ. Основным является возможность построения

нелинейных систем. Из недостатков стоит выделить отсутствие четких правил проектирования, невозможность полного аналитического описания сети и неинтерпретируемость выходных данных. Еще один из современных подходов к построению САУ является использование нечетких систем. Эти системы обладают следующими достоинствами: возможность работы в нелинейных режимах; описание поведения объектов управления на формальном языке; возможность использования априорной информации о системе для улучшения качества регулирования; низкая чувствительность к возмущениям. Некоторые недостатки нейронных сетей (отсутствие четких правил проектирования, невозможность полного аналитического описания сети присущи и нечетким системам) смягчаются применением гибридных систем управления, включающих в себя нечеткие системы и нейронные сети.

Таким образом, рассматриваемая в диссертации задача создания новых моделей движения КТ и разработки нечётких и нейронечётких регуляторов для САУД комплекса НК-КТ-НПА является актуальной.

**Во второй главе** создаются математические модели и синтезируются нечёткие регуляторы для системы управления комплексом НК-КТ-НПА. Создание математической модели КТ объясняется необходимостью определения формы КТ и его распределенных натяжений в каждый момент времени и исключения сильного провисания КТ и возможности обрыва из-за чрезмерного натяжения.

В диссертации для описания пространственного движения КТ исследована следующая известная система уравнений, в которой КТ представлен в виде нерастяжимой гибкой нити:

$$\begin{cases} U_x = V_{\Gamma m} \frac{\partial V_x}{\partial s} + a_2 \left[ (T - MV_{\Gamma m}^2) \frac{\partial m_x}{\partial s} + 2 \frac{\partial T}{\partial s} m_x - a_{\Phi T} V_{\Gamma x} + b_{\Phi T} V_{\Gamma m} m_x \right], \\ U_y = V_{\Gamma m} \frac{\partial V_y}{\partial s} + a_2 \left[ (T - MV_{\Gamma m}^2) \frac{\partial m_y}{\partial s} + 2 \frac{\partial T}{\partial s} m_y - a_{\Phi T} V_{\Gamma y} + b_{\Phi T} V_{\Gamma m} m_y \right], \\ U_z = V_{\Gamma m} \frac{\partial V_z}{\partial s} + a_2 \left[ (T - MV_{\Gamma m}^2) \frac{\partial m_z}{\partial s} + 2 \frac{\partial T}{\partial s} m_z - a_{\Phi T} V_{\Gamma z} + b_{\Phi T} V_{\Gamma m} m_z \right], \end{cases} \quad (1)$$

В этих уравнениях приняты обозначения:  $\bar{U} = \bar{U}(t, s) = (U_x, U_y, U_z)$  – вектор ускорения точки нити  $s$  в момент времени  $t$ ;  $\bar{m} = \bar{m}(t, s) = (m_x, m_y, m_z)$  – орт касательной к нити в точке  $s$  в момент времени  $t$ ;  $\bar{V}_\Gamma = \bar{V}_\Gamma(t, s) = (V_{\Gamma x}, V_{\Gamma y}, V_{\Gamma z}) = \bar{V} - \bar{W}$  – вектор скорости нити относительно воды в точке  $s$  в момент времени  $t$ ;  $\bar{V}_{\Gamma m} = \bar{V}_{\Gamma m}(t, s)$  – касательная составляющая  $\bar{V}_\Gamma$ ,  $\bar{V}_{\Gamma n}$  – нормальная составляющая  $\bar{V}_\Gamma$ :  $\bar{V}_\Gamma = \bar{V}_{\Gamma m} + \bar{V}_{\Gamma n}$ ,  $V_{\Gamma m} = V_{\Gamma m}(t, s) = \bar{V}_\Gamma \cdot \bar{m} = V_{\Gamma x} m_x + V_{\Gamma y} m_y + V_{\Gamma z} m_z$  – скалярное произведение  $\bar{V}_\Gamma$  и  $\bar{m}$ ,  $\bar{V}_{\Gamma n} = \bar{V}_{\Gamma n}(t, s) = \bar{V}_\Gamma - \bar{V}_{\Gamma m}$ ;  $T = T(t, s)$  – вектор натяжения нити в точке  $S$  в момент времени  $t$ ;  $a_{\Phi T} = k_\Phi + k_T$ ,  $b_{\Phi T} = k_\Phi - k_T$ . Коэффициенты  $k_\Phi$  и  $k_T$  определяют силу сопротивления нити текущей воде в поперечном и продольном направ-

лениях:  $k_\phi = k_d(1 - \mu)|\bar{V}_{\Gamma n}|$ ,  $k_T = k_d\mu|\bar{V}_\Gamma|$ ,  $k_d = 0.5\rho Dc_n$ ,  $\rho$  – плотность воды,  $D$  – диаметр нити,  $\mu$  – коэффициент нормального гидродинамического сопротивления,  $c_n$  – коэффициент трения нити.  $M = 0.25\rho\pi D^2$  – присоединённые массы воды на единицу длины нити;  $a_2 = 1/2M$ .

Будем теперь рассматривать КТ как упругую растяжимую гибкую нить, натяжение которой при малом растяжении определяется по закону Гука:  $T = f(dl/ds - 1)$ , где  $ds$  – длина элемента нити в свободном состоянии,  $dl$  – в натянутом состоянии и  $f$  – коэффициент упругости. При этом

$$dl = \sqrt{x_s'^2 + y_s'^2 + z_s'^2} ds, \text{ длина всей нити в натянутом состоянии есть}$$

$$l = \int_0^s dl = \int_0^s \sqrt{x_s'^2 + y_s'^2 + z_s'^2} ds \text{ и } x_s', y_s', z_s' \text{ – производные координат точек нити. От-}$$

сюда получаются выражения для натяжения и его производных по  $s$  и  $l$ :

$$T = f(\sqrt{x_s'^2 + y_s'^2 + z_s'^2} - 1), \quad \frac{\partial T}{\partial s} = f \frac{\bar{m} \cdot \frac{\partial \bar{m}}{\partial s}}{|\bar{m}|}, \quad \frac{\partial T}{\partial l} = \frac{\bar{m} \cdot \frac{\partial \bar{m}}{\partial s}}{|\bar{m}|^2}.$$

В итоге система уравнений (1) преобразуется к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_x = V_{\Gamma m} \frac{\partial V_x}{\partial s} + a_2 \left[ (f(|\bar{m}|) - 1) - MV_{\Gamma m}^2 \right] \frac{\partial m_x}{\partial s} + 2f \cdot \frac{\partial m_x}{\partial s} \cdot \frac{m_x^2}{|\bar{m}|} - a_{\Phi\Gamma} V_{\Gamma x} + b_{\Phi\Gamma} V_{\Gamma m} m_x \\ U_y = V_{\Gamma m} \frac{\partial V_y}{\partial s} + a_2 \left[ (f(|\bar{m}|) - 1) - MV_{\Gamma m}^2 \right] \frac{\partial m_y}{\partial s} + 2f \cdot \frac{\partial m_y}{\partial s} \cdot \frac{m_y^2}{|\bar{m}|} - a_{\Phi\Gamma} V_{\Gamma y} + b_{\Phi\Gamma} V_{\Gamma m} m_y \\ U_z = V_{\Gamma m} \frac{\partial V_z}{\partial s} + a_2 \left[ (f(|\bar{m}|) - 1) - MV_{\Gamma m}^2 \right] \frac{\partial m_z}{\partial s} + 2f \cdot \frac{\partial m_z}{\partial s} \cdot \frac{m_z^2}{|\bar{m}|} - a_{\Phi\Gamma} V_{\Gamma z} + b_{\Phi\Gamma} V_{\Gamma m} m_z \end{array} \right. \quad (2)$$

Преимущества этой системы уравнений перед уравнениями нерастяжимой нити в том, что она позволяет найти текущие ускорения элементов нити непосредственно из её состояния (положения и скорости элементов), минуя вычисление натяжений, которые естественным образом заложены во взаимном расположении элементов нити.

#### Численное решение уравнений движения КТ, связывающего НК и НПА.

Для численного решения уравнений движения КТ аппроксимируется  $N-1$  прямолинейными элементами (стержнями). Они соединены между собой на стыках (узлах) шарнирами без пружин и трения (рисунок 1). В начале моделирования длина элементов находится по формуле:  $\Delta l = \Delta s = S/(N-1)$ , где  $S$  – длина всего КТ. В дальнейшем длина элементов находится как расстояние между соответствующими узлами. Натяжение в каждом элементе зависит от его длины по закону Гука  $T = f(dl/ds - 1)$ . Вычисления производятся с дискретом по времени  $\Delta t$ . В

начале каждого такта  $\Delta t$  определяются для всех элементов кабеля учитываются: положение, скорость, гидравлические силы и собственное натяжения. Это позволяет из системы (2) найти ускорения узлов, которые на протяжении  $\Delta t$  считаются постоянными и пересчитываются в приращения координат узлов и их скоростей к концу такта. Для конечных узлов (НК и НПА) определяются соответствующие граничные условия. В частности, считается, что НК движется известным курсом с известной скоростью, не реагируя на КТ.

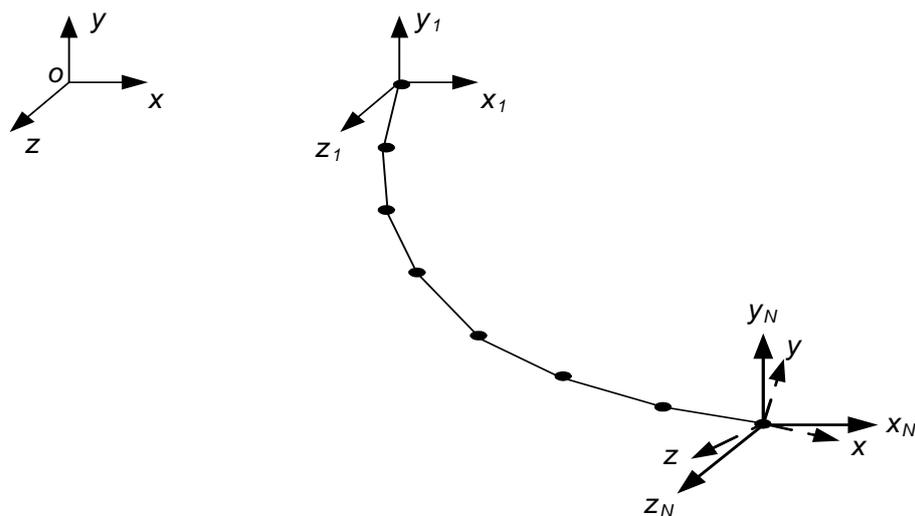


Рисунок 1 – Аппроксимация КТ прямолинейными отрезками

Таким образом, описанная вычислительная схема позволяет находить форму КТ и его распределённые натяжения в процессе движения. Отметим, что требуемый объём вычислений невелик – моделирование 100 секунд движения занимает 2 секунды машинного времени, что позволяет осуществлять прогнозирование ситуации наперёд с целью исключения аварийных ситуаций.

В качестве эксперимента было проведено сравнение результатов аналитического решения дифференциальных уравнений с результатами, полученными при компьютерном моделировании в режиме установившейся прямолинейной буксировки реального аппарата «CR-01» кабель-тросом. Эти результаты оказались практически совпадающими, что свидетельствует об адекватности разработанной модели КТ и алгоритма численного решения.

Рекомендации по выбору длины звена кабеля и длины КТ. В научной литературе нет общих правил для удовлетворительного выбора длины звеньев, обеспечивающей достаточно точную аппроксимацию формы КТ и приемлемый объём вычислений. Поэтому в диссертации такие рекомендации были выработаны. Звенья нельзя брать слишком короткими, так как это приводит к неустойчивости и сильным автоколебаниям схемы. Например, при небольших длинах (до 100м) КТ следует брать звенья от 10м, а при длине КТ 1000-6000м использовать звенья 20-150м.

В процессе манёвров длина КТ может существенно изменяться, что учтено в вычислительной схеме следующим образом. Если КТ увеличивается, то дополнительная длина добавляется к первому звену пока оно не становится слишком большим, тогда оно делится на два звена. При сокращении общей длины КТ число его звеньев сокращается.

При планировании движения комплекса НК-КТ-НПА желательно, чтобы КТ оказывал возможно меньшее воздействие на НПА, то есть натяжение КТ у НПА было бы минимально возможным. Это при данных условиях (скорость и направление движения и течения воды, взаимное расположение НК и НПА) достигается заданием оптимальной длины КТ. Проведённое моделирование показало, что оптимальная длина КТ в районе петли в 4-4.5 раза больше расстояния между её концами.

Управление корабельной лебедкой. На рисунке 2 представлена структурная схема САУ корабельной лебедкой с предлагаемым нечётким регулятором. Здесь приняты следующие обозначения:  $e(t) = L_3 - L(t)$  – отклонение заданной длины ( $L_3$ ) от текущей ( $L(t)$ );  $U(t)$  – проекция момента силы, создаваемый действием крутящего момента электродвигателя лебедки на ось лебедки;  $R_L$  – радиус барабана лебедки;  $V(t)$  – скорость движения верхней части КТ;  $T_{КТ}(t)$  – натяжение КТ со стороны НК;  $J$  – момент инерции барабана лебедки.

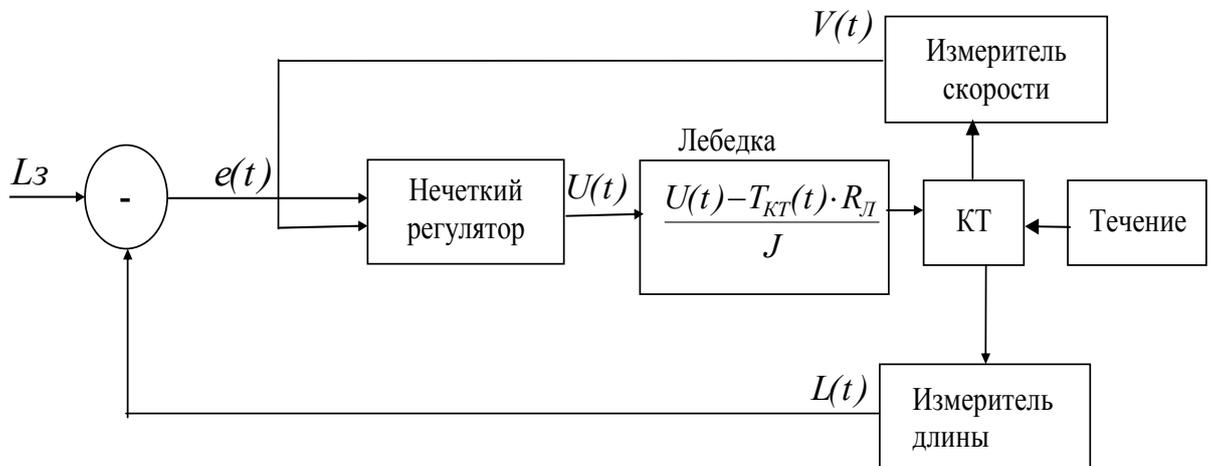


Рисунок 2 – Схема САУ корабельной лебёдкой с нечётким регулятором

Нечеткий регулятор работает по стандартной схеме: фаззификация (приведение к нечеткости) → агрегирование (определение степени истинности условий) → аккумуляция (нахождение функций принадлежности для каждой из выходных переменных) → дефаззификация (нахождение четкого значения для выходной переменной).

На рисунок 3 приведены функции принадлежности, которые используются при фаззификации. Здесь  $\mu(e)$ ,  $\mu(V)$ ,  $\mu(U)$  – функции принадлежности соответст-

вующих величин. Для описания входной переменной  $e$  диапазон ее значений делится 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  $V$  диапазон ее значений делится на три подмножества: N – отрицательный (Negative); Z – около нуля (Zero); P – положительный (Positive). Для описания выходной переменной  $U$  используются пять подмножеств: NL, NS, Z, PS и PL.

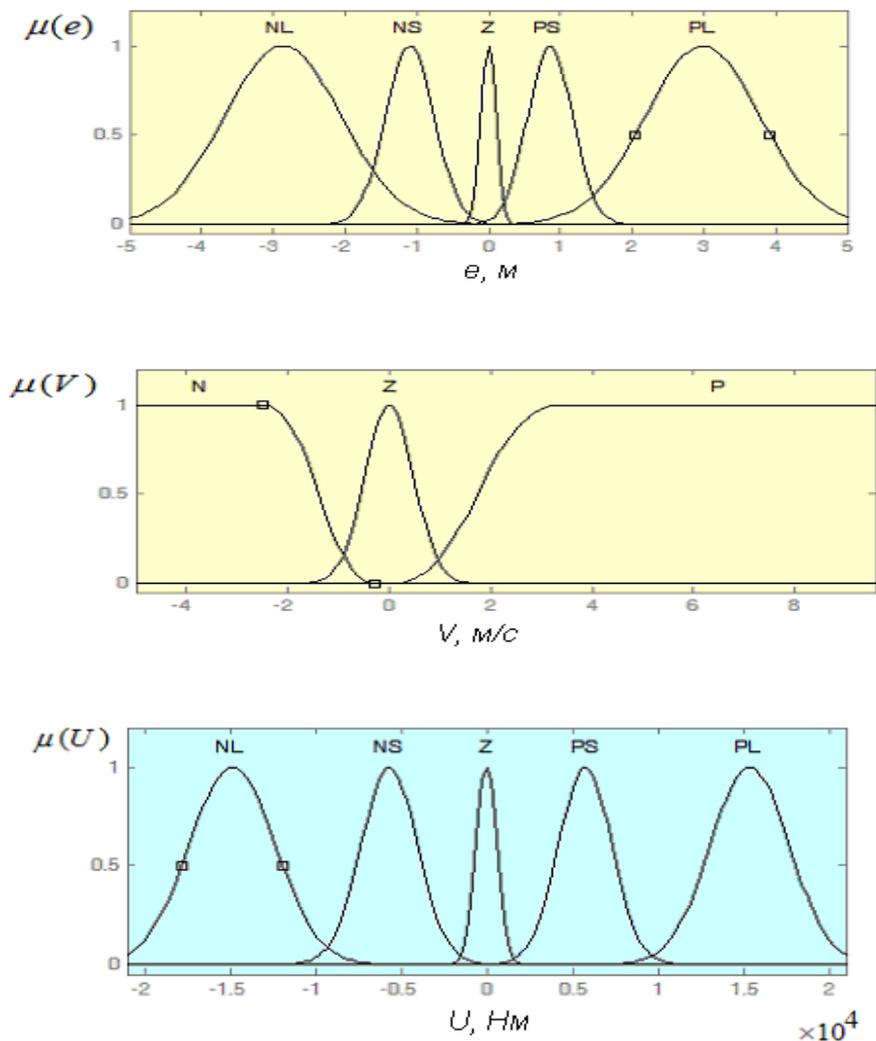


Рисунок 3 – Функции принадлежности

Для нечеткого вывода использовалась нечеткая модель типа Мамдани, 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. В таблице 1 представлен созданный для управления длиной КТ набор правил (табл. 1). При этом

каждое правило указывает, как нужно изменить управляющий момент в зависимости от наблюдаемых входных величин. При дефазификации использовался метод центра тяжести. На выходе регулятора получается четкое значение управляющего момента  $U$ .

Таблица 1. База правил нечеткого регулятора

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

Для исследования созданной нечеткой системы управления проведено сравнительное моделирование системы управления на основе ПД-регулятора и на основе нечеткого регулятора. При моделировании использованы характеристики реальной лебедки СВЛ-4, выпускаемой инженерной фирмой «Симбия». При моделировании задавалась начальная длина КТ – 100 м, глубина погружения НПА – 26 м, заданная длина кабеля – 98 м. На рисунке 4 представлен график зависимости длины КТ от времени при управлении ПД-регулятором и при управлении нечетким регулятором.

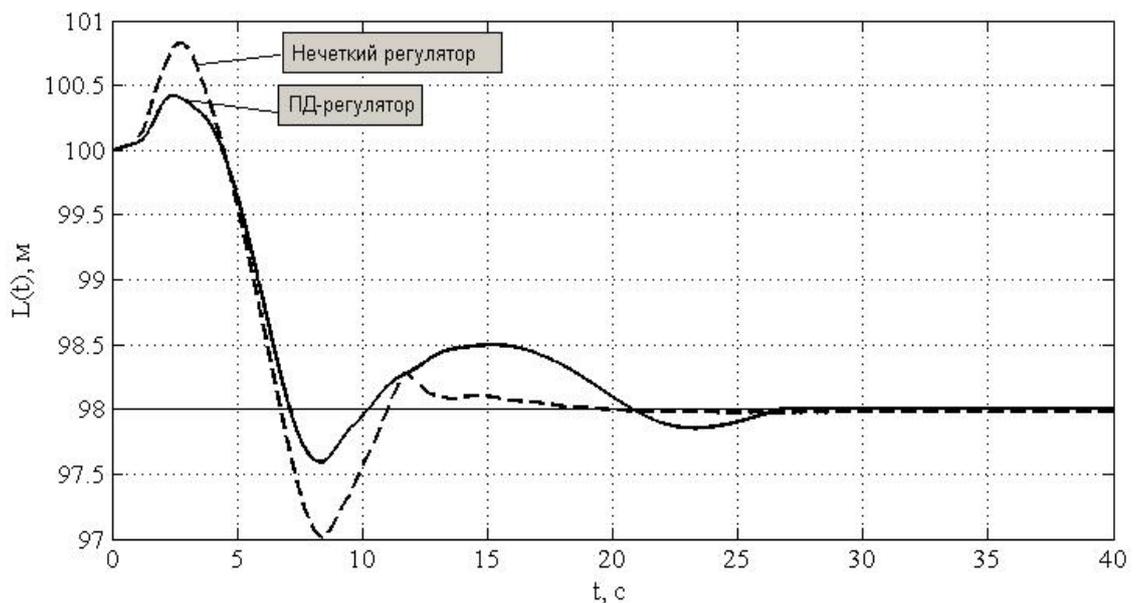


Рисунок 4 – Пример управления ПД-регулятором и нечётким регулятором

Проведенное моделирование с приведенными выше параметрами показало, что синтезированный нечеткий регулятор стабилизирует длину КТ у заданного значения быстрее, чем классический ПД-регулятор (на 7 секунд), но при этом перерегулирование процесса управления при использовании ПД-регулятора чуть

меньше. 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 и может корректироваться в процессе эксплуатации.

Управление движением НПА в режиме стабилизации курса на основе методов нечеткой логики с нейросетевой настройкой параметров. Задачей управления является обеспечение движения НПА заданным курсом. В известных системах управления эта задача решается с помощью ПД-регулятора вида:  $u(t) = K(e(t) + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt})$ , где  $u(t)$  – управляющее воздействие;  $K$  – коэффициент усиления регулятора;  $e(t) = \varphi_{зад} - \varphi_{тек}$  – отклонение текущего курса от заданного курса;  $T_d$  – постоянная времени дифференцирования регулятора. На рисунке 5 представлена структурная схема системы управления движением НПА на основе нечеткого регулятора, используемого для решения задачи стабилизации курса НПА.



Рисунок 5 – Структурная схема САУД НПА с нечетким регулятором

На схеме нечеткий регулятор состоит из блока «Нечеткий вывод» и блока «База правил». В качестве алгоритма нечеткого вывода применяется алгоритм Сугено. В нечетком регуляторе содержится 16 правил. В левой части правил определяются все возможные ситуации движения. В правой части правил находятся линейные зависимости вида:  $f_j(e, \frac{de}{dt}) = b_{j,0} + b_{j,1}e + b_{j,2} \frac{de}{dt}$ , где  $j$  – номер правила нечеткого вывода;  $b_{j,0}$ ,  $b_{j,1}$ ,  $b_{j,2}$  – коэффициенты заключений правил нечеткого вывода. Функцией принадлежности входных и выходной переменных выбрана функция Гаусса.

На рисунке 6 представлена структура предлагаемого нейронечеткого регулятора (ННР), созданного в программе MatLab. ННР представляет собой нейронную сеть, слои которой описывают входные величины нечеткого регулятора, функции

принадлежности входных величин, правила нечеткого вывода, функции принадлежности выходных величин и выходные величины нечеткого регулятора.

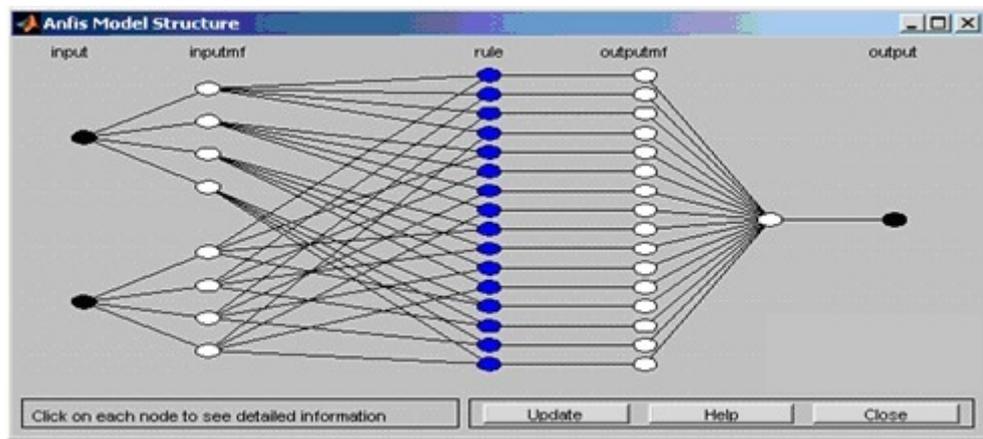


Рисунок 6 – Структура нейронечеткого регулятора

Для использования ННР для управления движением НПА в режиме стабилизации курса алгоритм предварительно должен быть настроен. Для настройки ННР использовался метод обратного распространения ошибки, основанный на идеях метода наискорейшего спуска. Для получения обучающих данных было промоделировано управление курсом НПА с помощью ПД-регулятора, при этом сохранялись входная и выходная выборки данных для последующего обучения ННР. Результаты обучения представлены в настроенной базе правил.

Таблица 2. Примеры правил нечеткого вывода после обучения

|      | Значения нечетких термов лингвистической переменной – «отклонение от заданного курса», граничные значения |   | Значения нечетких термов лингвистической переменной – «угловая скорость рыскания», граничные значения |    | Функция выходной переменной «управляющий момент» |
|------|---|---|---|----|--|
| ЕСЛИ | 'большое и отрицательное'<br>[-0.8113 0.2681]   | И | 'большая и отрицательная'<br>[-0.394 0.1067]  | ТО | $168.5 - 0.89e + 42.54 \frac{de}{dt}$            |
|      | 'большое и отрицательное'<br>[-0.8113 0.2681]   |   | 'около нуля, левая'<br>[-0.2945 0.1833]   |    | $-9393 + 1767e - 8750 \frac{de}{dt}$             |
|      | 'большое и отрицательное'<br>[-0.8113 0.2681]   |   | 'около нуля, правая'<br>[0.06893 0.09575]   |    | $-2013 + 2067e - 2535 \frac{de}{dt}$             |

С целью исследования эффективности разработанного алгоритма было выполнено моделирование движения комплекса «НК-КТ-НПА» с помощью разработанного комплекса программ, функционирующего в режиме управления с применением ННР. У НПА задавался начальный курс –  $0^\circ$ , заданный курс –  $10^\circ$ . Моделирование течения осуществлялось по формуле  $W_x = W_z = 2 \sin(0.8t)$ . Сравнение результатов работы ННР с результатами работы ПД-регулятора позволяет сделать вывод о том, что ННР обеспечивает примерно одинаковое качество управления с оптимальным ПД-регулятором (среднее отклонение курса от заданного при управлении с помощью ПД-регулятора составило  $0.99$  градусов, а при управлении с помощью ННР –  $1.08$  градусов). Однако настройка коэффициентов оптимального ПД-регулятора является трудоемкой операцией, а настройка нечеткого регулятора более проста. Кроме того, имеется возможность повышения его точности за счет увеличения объема выборки обучения, количества правил нечеткого вывода для ННР и использования других функций принадлежности входных и выходной переменных.

**В третьей главе** рассматривается комплекс программ и аппаратной реализации модели управления НПА связанного с НК кабель-тросом.

На рисунке 7 показана общая функциональная схема комплекса НК КТ НПА. Для управления НПА используется прямоугольная система координат. Начало отсчета (репер) задается в САУ НК. Здесь же происходит планирование движения НПА – создание миссии для НПА. Для этого в САУ НК имеется несколько пультов управления НПА. После создания миссия поступает на САУ НПА, которая также находится на НК. Здесь происходит анализ полученной миссии и формирование на ее основе управляющих сообщений для НПА, которые передаются на него через КТ. На НПА данные сообщения обрабатываются в ЭВМ автопилота, и затем полученная миссия выполняется. Сообщения для автопилота НПА содержат координаты опорных точек заданной траектории, а также различные команды управления. Для определения координат НПА на нем имеется гидроакустический маяк, который передает сигналы на выносной гидроакустический приемник, установленный на НК. На НК полученные данные обрабатываются в ГАНС и передаются на САУ НПА. Координаты НПА могут определяются с помощью ИНС, который включает в себя эхолот, доплеровский лаг и гирокомпас.

Сигналы управления с автопилота аппарата поступают на движительно-рулевой комплекс, который может быть реализован в разных конфигурациях. Эти конфигурации различаются набором подруливающих устройств и набором винтов. Для связи НК и НПА между собой на них устанавливаются блоки связи. Связь между устройствами на НПА и НК обеспечивают ЛВС. Для обмена информацией в ЛВС используется как высокоскоростной канал Ethernet, так и относительно низкоскоростные последовательные каналы (RS232, RS485). Некоторые устройства могут объединяться в группы по схожести передаваемой информации и по последовательному каналу (RS485) обмениваться информацией с автопилотом. Для адекватного обмена сигналами между автопилотом и устройствами в

ЛВС НПА устанавливаются мосты, которые конвертируют сигналы RS485 и RS232 между собой. Таким образом, образуется несколько групп последовательных каналов, которые через мосты соединяются с автопилотом. Выход из строя одной из этих групп не приводит к нарушению работы всей сети. Некоторые устройства (пилотажные датчики) подключаются по RS232 к автопилоту.

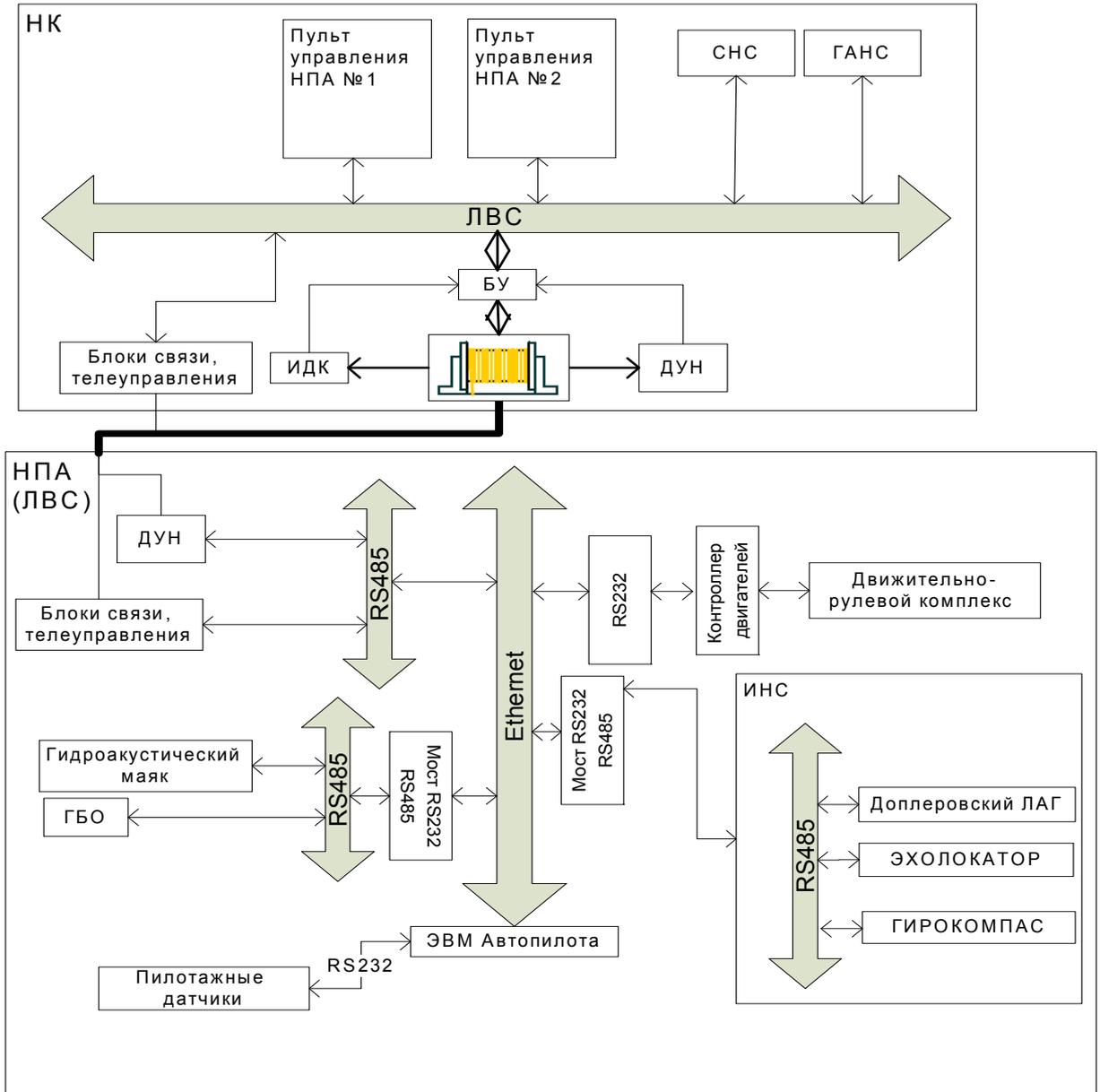


Рисунок 7 – Общая структура системы управления НК и НПА

При погружении или всплытии НПА на НК срабатывает лебедка, стравливающая или выбирающая КТ. Корабельная лебедка может управляться либо с помощью джойстика, находящегося на пультах САУ НК, либо автоматически. Для автоматического управления лебедкой имеется БУ лебедки, который на основе информации с ИДК и ДУН вырабатывает соответствующие сигналы управления.

Для создания моделей нейронечетких регуляторов используется математический пакет MatLab/Simulink. Для этого используется библиотека *anfisedit*, в которой происходит создание и настройка сети нечеткого вывода ANFIS. Результаты создания и настройки ANFIS-сети сохраняются в файле в текстовом виде, имеющем расширение .fis. Данный файл компонуется с функциями обработки файлов данного типа, и создается библиотека dll, функции которой используются при работе КП.

Интерфейс комплекса программ. Главное окно КП представлено на рисунке 8. Окно программы визуально разделено на две части. Левая часть окна – область отображения комплекса «НК-КТ-НПА» в двух плоскостях: вертикальной и горизонтальной. В правой части окна находятся диалоговые окна.

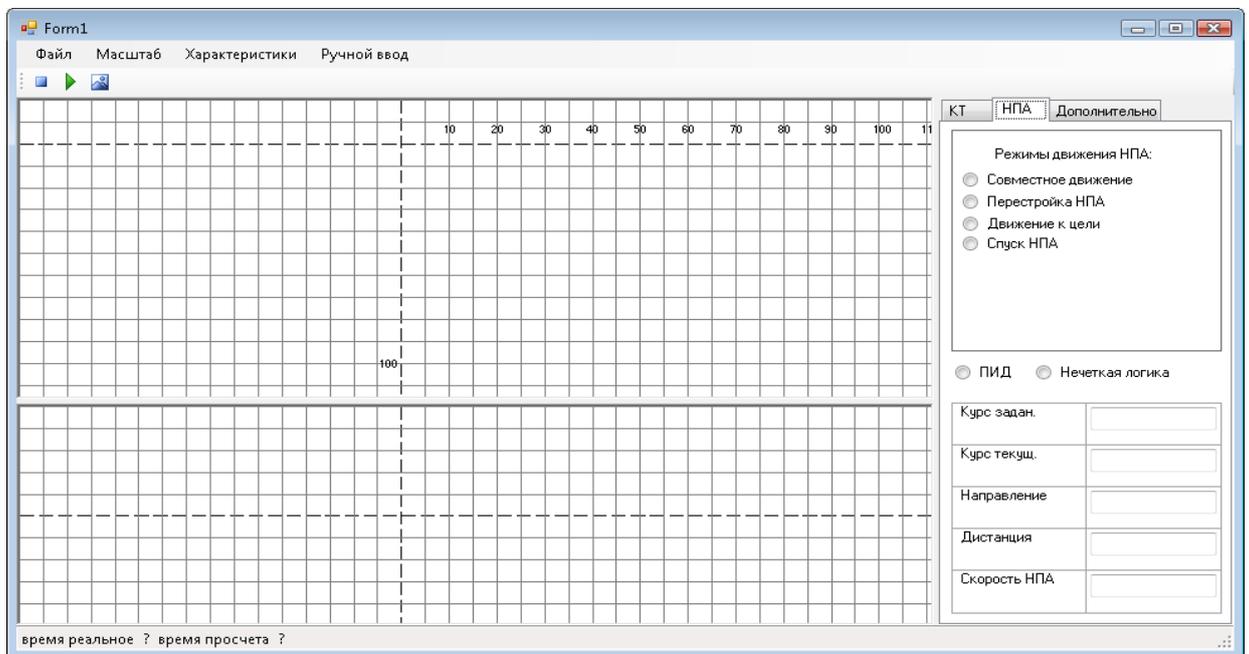


Рисунок 8 – Главное окно КП

В окнах правой части оператор может выбрать одну из трех вкладок: «КТ», «НПА», «Дополнительно». Диалоговые окна соответствующих вкладок состоят из элементов, с помощью которых можно задавать определенные параметры моделей НПА и КТ.

**В заключении** формулируются основные результаты и выводы.

1. Синтезирована новая математическая модель движения КТ, учитывающая его физическое свойство – растяжимость. Даны рекомендации по выбору длины звена КТ при дискретном его представлении. На основе этой модели создан численный алгоритм вычисления текущей формы КТ и его распределённых натяжений в различных режимах движения системы НК-КТ-НПА. Этот алгоритм требует примерно на 30% меньше вычислений, чем алгоритм на основе жёстких шарнирных звеньев.

2. Разработан алгоритм поиска оптимальной конфигурации КТ, при которой он оказывает минимальное воздействие на НПА. В частности, выявлено, что оптимальная длина КТ в районе петли в 4-4.5 раза больше расстояния между её концами.

3. Разработан нечёткий регулятор для системы управления корабельной лебедкой, обеспечивающий поддержание оптимальной длины КТ. Он обеспечивает оптимальную длину КТ примерно на 35 % быстрее, чем ПД-регулятор при примерно равных прочих показателях.

4. Разработан нейронечёткий регулятор системы управления движением НПА, связанным КТ с НК, который обеспечивает примерно одинаковое качество управления с оптимальным ПД-регулятором. Однако настройка коэффициентов ПД-регулятора является трудоемкой операцией, а настройка нечеткого регулятора более проста. Кроме того, этот нечёткий регулятор способен адаптироваться к изменяющимся условиям за счёт накапливающегося объёма обучающей выборки в процессе работы.

5. Создан комплекс программ для исследования и практической реализации алгоритмов поиска оптимальных конфигураций КТ и управления движением корабельной лебедкой и НПА, использующий разработанные в диссертации модели и алгоритмы.

**В приложениях** содержится акт внедрения результатов диссертационной работы и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях.

#### **В изданиях из перечня ВАК:**

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

2. Крашенинников В.Р. Модель движения кабель-троса, связывающего надводный носитель и необитаемый подводный аппарат/ Крашенинников В.Р., Шигапов Р.Д. // Автоматизация процессов управления. – 2013. – N 1 (31). – С. 80-85.

3. Шигапов Р.Д. Синтез нечёткого регулятора для управления корабельной лебёдкой/ Шигапов Р.Д., Крашенинников В.Р., Маттис А.В. // Автоматизация процессов управления. – 2014. – №2 (36). – С. 9-15.

#### **В других изданиях:**

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

5. Крашенинников В.Р. Моделирование управления движением подводного аппарата, связанного с надводным кораблем / Крашенинников В.Р., Шигапов Р.Д.

// Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение, вып. XII-1, 12-я международная конференция – М.: Радиотехника, 2010. – С.288-291.

6. Шигапов Р.Д. Синтез нечеткого регулятора для управления корабельной лебедкой // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: тр. седьмой Всеросс. науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ), г. Ульяновск, 22–23 сентября 2011 г. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 127-130.

7. 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.

8. Шигапов Р.Д. Приведение к цели необитаемого подводного аппарата, связанного с кораблём кабель-тросом // Прикладная математика и механика: сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 489-493.

9. Крашенинников В.Р. Выбор длины звена при моделировании движения кабель-троса, соединяющего надводный носитель и необитаемый подводный аппарат/ Крашенинников В.Р., Шигапов Р.Д. // Матер. третьей научно-практ. internet-конф. «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики», 20–21 февраля 2014 г. – Ульяновск: SIMJET, 2014. – С. 237-241.

10. Шигапов Р.Д. Программа, моделирующая движение кабель-троса, связывающего надводный носитель и необитаемый подводный аппарат. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013616199, зарег. 01.07.201.

Шигапов Ринат Дамирович

Разработка и моделирование системы управления движением подводного аппарата, связанного кабель-тросом с кораблем

Автореферат

Подписано в печать                      Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Усл. печ. л.      . Уч.-изд. л.      .

Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.