

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»

Робототехника и искусственный интеллект

Материалы VIII Всероссийской
научно-технической конференции
с международным участием

г. Железногорск, 25 ноября 2016 г.

Электронное издание

Под научной редакцией В.А. Углева

Железногорск, 2016

УДК 004.896(08)
ББК 32.816я43
Р584

Р584 Робототехника и искусственный интеллект : материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Железногорск, 25 ноября 2016 г.) / под науч. ред. В.А. Углева. – Электрон. дан. (6,4 Мб). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. – 220 с.
1 электрон. опт. диск. (CD-Rom). – Систем. требования : PC не ниже класса Pentium I ; 128 Mb Ram ; Windows 98/XP/7 ; Adobe Reader V 8.0 и выше. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7638-3610-3

Сборник включает тексты докладов участников конференции по различным вопросам робототехники и искусственного интеллекта.

Основными темами конференции стали мехатроника, системы искусственного интеллекта при управлении роботами, формирование баз знаний и интеллектуальных алгоритмов, экстремальная и образовательная робототехника, а также модели симуляции работы мозга.

Представляет интерес для научных работников, аспирантов, преподавателей вузов, магистрантов, студентов и школьников.

УДК 004.896(08)
ББК 32.816я43

ISBN 978-5-7638-3610-3

© МБК ПФКТ СФУ, 2016

Электронное научное издание

Подготовлено к публикации издательством
Библиотечно-издательского комплекса

Подписано в свет 13.01.2017. Заказ № 43
Тиражируется на машиночитаемых носителях

Библиотечно-издательский комплекс Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а, тел. (391) 206-26-67
<http://bik.sfu-kras.ru>; e-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1

Робототехнические системы и комплексы, мехатроника 7

Алейников А.Ю., Ломакин В.В., Афонин А.Н., Гладышев А.Р. (Белгород)

Реализация роботизированной установки для укладки облицовочного кирпича 8

Алейников А.Ю., Усатый И.М., Афонин А.Н., Гладышев А.Р., Попова А.В. (Белгород)

Исследование механики змееподобного робота для инспекции трубопроводов 12

Будков В.Ю., Дашевский В.П. (Санкт-Петербург)

Встраиваемые вычислители на основе SMARC-модулей для обработки аудиовизуальных сигналов в робототехнических комплексах 18

Горобцов А.С., Андреев А.Е., Скориков А.В., Тарасов П.С. (Волгоград)

Управление локомоцией антропоморфного робота в квазистатическом режиме 24

Кондратьев К.В., Сергеевич В.Н., Двирный В.В. (Железногорск)

Эффект гистерезиса в работе пьезокерамического биоморфа 29

Крахмалев О.Н., Петрешин Д.И., Крахмалев Г.Н., Пимонов А.Ю. (Брянск)

Методы калибровки центра инструмента промышленных роботов 34

Лебедев А.В. (Владивосток)

Синтез адаптивной СПС для нестационарного робототехнического объекта при наличии ограничений управляющего сигнала 41

Подмазов И.В. (Минск)

Проблема излишнего количества степеней подвижности в роботе-шаре параллельной структуры с четырьмя опорами 47

Рыжиченко А.И. (Брянск)

Решение обратной задачи о положении характерной точки для промышленного робота KUKA KR6 54

Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Проценко А.А. (Владивосток)

Метод синтеза наблюдателей для определения величин возникающих дефектов в робототехнических системах 58

Губанков А.С., Зуев А.В. (Владивосток)

Особенности синтеза скоростных высоконадежных систем управления промышленными роботами 64

Секция 2

Специальная робототехника 70

- Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Пермяков А.Ф., Сычков В.Б. (Москва)*
Антропоморфные роботы – составляющая научной аппаратуры орбитальных станций 71
- Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. (Владивосток)*
Метод автоматического подхода подводного аппарата к донной поверхности с заданной ориентацией 81
- Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. (Владивосток)*
Подход к автоматическому выполнению подводных манипуляционных операций 87
- Кудымов В.И., Владимиров А.В. (Железногорск)*
Повышение точности спутниковой навигации автономных мобильных аппаратов 93
- Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р. (Санкт-Петербург)*
Гибридные мобильные подводные роботы: тренд развития 103
- Медведев А.А., Углев В.А. (Железногорск)*
Автожир как объект для создания автопилота 111
- Шушляпин Е.А., Карапетьян В.А., Афонин А.А., Филлер И.Ю. (Севастополь)*
Задачи безэкипажного судоходства и математическая модель научно-исследовательского судна «Пионер-М» 116

Секция 3

Системы искусственного интеллекта

в управлении роботами

и в промышленной автоматизации 122

- Самигулина З.И., Шулбаева А.М. (Алматы)*
Автоматизация сложных объектов нефтегазовой отрасли с применением методов искусственного интеллекта 123
- Устинов Н.С., Идрисова Ю.В., Фкцак С.И. (Уфа)*
Система диагностики мехатронных станков с использованием искусственных нейронных сетей 129
- Чернышев В.В., Арыканцев В.В., Вершинина И.П. (Волгоград)*
Разработка базы правил определяющих стратегию управления подводным шагающим роботом в недетерминированной среде 136

<i>Юхимец Д.А. (Владивосток)</i> Нейронная сеть для формирования оптимальных гладких траекторий, построенных на основе сплайнов Безье	142
---	-----

Секция 4

Алгоритмы искусственного интеллекта и базы знаний	148
--	------------

<i>Исхаков А.Р., Маликов Р.Ф. (Уфа)</i> Вычисление площади объекта на размытых снимках генетическим алгоритмом	149
<i>Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Зувев А.В., Губанков А.С. (Владивосток)</i> Метод совмещения симметричных трёхмерных облаков точек.....	156
<i>Углев В.А., Егорова Д.В. (Железногорск)</i> Анализ публикационной активности учёного и методы Graph Mining	162
<i>Чащина А.Н. (Железногорск)</i> Методическое обеспечение интеллектуальной системы поддержки принятия решений по подбору сотрудников в организацию.....	169

Секция 5

Программная и аппаратная симуляции работы мозга	174
--	------------

<i>Малявко А.А., Денисов А.А., Морозов А.Е. (Новосибирск)</i> Алгоритмы симулятора растущей нейронной сети с элементами самообучения	175
<i>Семёнов Е.В. (Томск)</i> Решение обратной задачи электроимпедансной томографии в круге с использованием многослойной искусственной нейронной сети.....	181

Секция 6

Образовательная робототехника	187
--	------------

<i>Гаврилов А.В. (Новосибирск)</i> К вопросу об этике интеллектуальных роботов	188
<i>Грищенко И.А., Рублева М.Е., Чубарь А.В., Шадрин Т.А. (Красноярск)</i> Проектирование робота с дифференциальным двигателем в среде визуального моделирования SimInTech.....	194

Емельянова Е.Н. (Минск)

Тенденции внедрения технологии образовательной робототехники в практика работы учреждений образования в условиях сетевого взаимодействия 200

Кузьмина Н.А. (Железногорск)

Структура интеллекта по Гилфорду 207

Рогожникова М.А. (Железногорск)

Особенности взаимодействия обучающих систем с операторами оборудования специального назначения 211

Филимонов В.А. (Омск)

Соционика для роботов: прототип модели 215

Секция 1

**РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ,
МЕХАТРОНИКА**

А.Ю. Алейников, старший преподаватель, aleinikov@bsu.edu.ru
В.В. Ломакин, к.т.н, профессор, lomakin@bsu.edu.ru
А.Н. Афонин, д.т.н., профессор, afonin@bsu.edu.ru
А.Р. Гладышев, магистрант, 1173079@bsu.edu.ru
НИУ "БелГУ", г. Белгород, Россия

РЕАЛИЗАЦИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ УКЛАДКИ ОБЛИЦОВОЧНОГО КИРПИЧА

Ааннотация: В работе предложена реализация роботизированной установки по укладке облицовочного кирпича. Конструкция позволяет в полуавтоматическом режиме выполнять операции по захвату и перемещению строительного материала с базовой точки к месту укладки, с одновременным нанесением кладочного раствора, контролировать качество кладки и корректировать дефекты. Предложенные решения сочетают в себе недорогую элементную базу, просты в использовании, но при этом позволяют уменьшить время технологического процесса, увеличить его скорость и качество.

Ключевые слова: робототехника, укладка, облицовочный кирпич, система управления, кладочный раствор

IMPLEMENTATION OF ROBOTIC INSTALLATION FOR LAYING FACING BRICK

A.Yu. Aleynikov, aleinikov@bsu.edu.ru
V.V.Lomakin, Ph.D, professor, lomakin@bsu.edu.ru
A.N.Afonin, professor, afonin@bsu.edu.ru
A.R.Gladishev, 1173079@bsu.edu.ru
NRU "BelSU", Belgorod, Russia

Abstract: The paper presents the implementation of a robotic installation for laying bricks. The design makes it possible to perform semi-automatic capture and movement of construction material from the base point to the place of installation, with the simultaneous application of masonry mortar, masonry quality control and correction of defects. The proposed solution combines an inexpensive element base, easy to use, but it can reduce the time the process and increase its speed.

Key words: robotics, styling, face brick, the control system, mortar

Введение. Строительное оборудование является одним из наиболее востребованных на российском рынке. Использование роботизированных систем при возведении строений для России является новым, но достаточно перспективным направлением. Исключение человеческого фактора, улучшение качества и увеличение скорости выполнения технологических строительных операций являются основными, но не единственными преимуществами, достигаемые посредством использования техники данного вида [1].

Облицовка строений играет одну из ведущих ролей в строительстве [2]. И если визуальные дефекты каркаса здания, такие, как, например, качество укладки строительного материала, наличие подтеков кладочного раствора, неравномерность шва, как правило, закрываются изнутри посредством использованием различных технологий по отделке, а снаружи наличием облицовки как таковой, то качество выполнения последней имеет первостепенное значение.

В настоящее время на рынке услуг преимущественно присутствуют предложения по ручной укладке с использованием различных механических приспособлений и без таковых. При этом, стоимость работ зачастую сопоставима цене строительного материала (кирпича) без учета расходов на кладочную смесь и установку строительных лесов.

Применение современных решений по укладке облицовочного кирпича [3], основанных на использовании манипулятора с наличием нескольких степеней свободы, ввиду достаточно высокой цены нецелесообразно для использования на объектах индивидуального жилищного строительства.

В связи с указанными причинами, является актуальной задачей реализация недорогой роботизированной установки по укладке облицовочного кирпича.

Устройство и принцип действия. Основой установки является рама 1, с закрепленным на ней механизмом перемещения системы вдоль уложенного кирпичного ряда, колесного типа 2 и панелями 3. (рис. 1.)

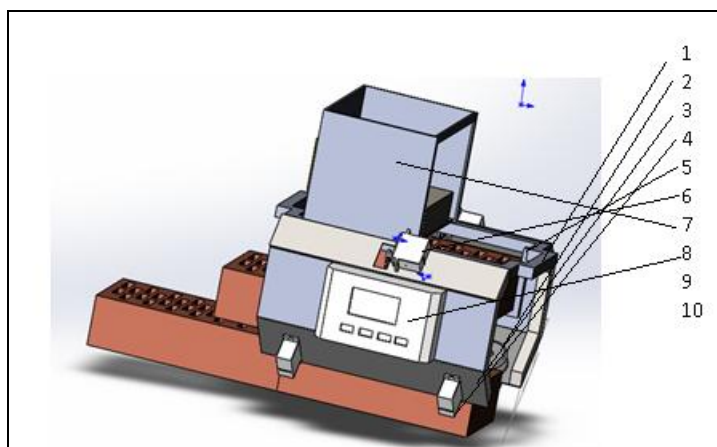


Рис. 1. 3D модель конструкции установки

Каждое из четырех колес приводится в движение отдельным сервоприводом 4. Для захвата и удерживания ктрпича предназначена каретка 5 (2 штуки) с независимым управлением, которая одновременно выполняет функции рамки (прутка) для формования кладочного раствора. Детальная конструкция приведена на рисунке 2.

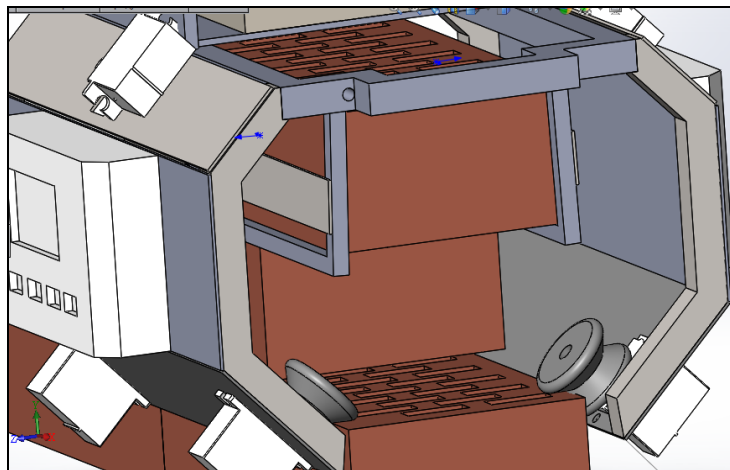


Рис 2. Конструкция захватного устройства

За отвод рамки отвечает сервопривод 6 (и симметричный ему), управляющий кривошипно-шатунным механизмом. Бункер 7 совместно с перемещаемым автоматически питателем предназначен для укладки цементно-песчанного раствора. В нем также расположена система транспортировки кладочного раствора шнекового типа.

За управление режимами работы установки отвечает микроконтроллерная система 8. Питание осуществляется от LiPo аккумуляторной батареи.

Для определения продольного расстояния используется модернизированный лазерный дальномер, аналогичный применяемому в строительстве.

Для обеспечения работы установки предварительно должны быть уложены нижние два ряда облицовочного кирпича. Благодаря наличию колесной группы, она способна перемещаться вдоль возводимой стены и перемещать кирпичи с раствором от одного из углов в заданную позицию в соответствии с проектом.

Укладка раствора [4,5,6,7] осуществляется автоматическим питателем (рис. 3.) в две стадии.

При достижении кирпича, переносимого роботом, расстояния до уже уложенного, равного его длине по большей стороне, питатель автоматически опускается на расстояние порядка 8 мм до поверхности нижнего кирпича и включается система подачи раствора. Затем, когда робот подходит к уже уложенному кирпичу слева (справа), питатель с заданной скоростью поднимается вверх, тем самым обеспечивая заполнение поперечного шва.

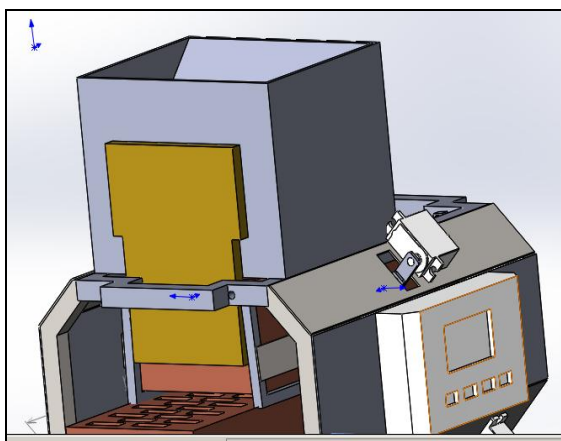


Рис. 3. Система укладки раствора

Далее включается система проверки корректности и коррекции проведения операции укладки.

Заключение. Предложена модель роботизированной установки для осуществления процесса автоматической укладки облицовочного кирпича. Она способна выполнить полный цикл укладки кирпича в полуавтономном режиме. В ее основу положены правила и принципы, используемые обычным каменщиком в работе, однако выполняемые ею в автоматическом режиме с увеличенной скоростью за счет использования современной элементной базы.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания №2014/420-723. (Разработка конструкции, технологии изготовления и программного обеспечения мобильного робототехнического устройства.)

Список литературы

1. Шмитько Е. И. Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий. – М.: Проспект Науки, 2010. - 736 с.
2. Инженерные сооружения в транспортном строительстве.– М.: Академия, 2008. - 352 с.
3. Белецкий Б. Ф., Булгакова И. Г. Строительные машины и оборудование.– М.: Феникс, 2005. - 608 с.
4. Киреева Ю. И., Лазоренко О. В. Строительные материалы и изделия. – М.: Феникс, 2010. - 384 с.
5. Основин В. Н., Шуляков Л. В. Строительные материалы и изделия. – М.: Высшая школа, 2009. - 224 с.
6. Основин В. Н., Шуляков Л. В., Дубяго Д. С. Справочник по строительным материалам и изделиям. – М.: Феникс, 2008. - 448 с.
7. Стаценко А. С. Технология строительного производства. – М.: Феникс, 2008. - 416 с.

А.Ю. Алейников, старший преподаватель, aleinikov@bsu.edu.ru

И.М. Усатый, 718097@bsu.edu.ru

А.Н. Афонин, д.т.н., профессор, afonin@bsu.edu.ru

А.Р. Гладышев, 1173079@bsu.edu.ru

А.В. Попова, 1137828@bsu.edu.ru

НИУ "БелГУ", г. Белгород, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИКИ ЗМЕЕПОДОБНОГО РОБОТА ДЛЯ ИНСПЕКЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

Аннотация: В работе проведено исследование механики змееподобного робота для инспекции трубопроводов методом уравнения Лагранжа. В качестве объекта для исследования была использована конструкция звена собственной разработки, совмещающая одновременно функции редуктора.

Ключевые слова: змееподобный робот, уравнение Лагранжа, сервопривод, зубчатое колесо, зубчатая рейка, звено

MECHANICS RESEARCH OF SNAKE LIKE ROBOT FOR INSPECTION OF PIPELINES

A.Yu. Aleynikov, aleinikov@bsu.edu.ru

I.M. Usatyy, 718097@bsu.edu.ru

A.N. Afonin, professor, afonin@bsu.edu.ru

A.R. Gladishev, 1173079@bsu.edu.ru

A.V. Popova, 1137828@bsu.edu.ru

NRU "BelSU", Belgorod, Russia

Abstract: The paper studied the mechanics of the snake-like robot for inspection of pipelines Lagrange equation method. As the object of study for the construction of its own design unit was used, combining both functions of a reducer.

Keywords: snake-like robot, Lagrange equation, servo gear rack, link

Введение. Использование змееподобных роботов для проведения инспекционных работ в трубопроводах является перспективным в связи с наличием у них большого числа степеней свободы, что дает возможность перемещаться практически в любой среде, имеющей различные препятствия, в том числе и по поверхности, имеющей значительный уклон. В связи с тем, что конструкция, как правило, имеет большое число сервоприводов и

звеньев, и следовательно значительную массу, важным вопросом является всестороннее исследование и моделирование механики робота с целью построения оптимального алгоритма управления, в полной мере определяющего качественные характеристики функционирования робота..

Исследование. 3d модель механической конструкции змееподобного робота представлена на рисунке 1.

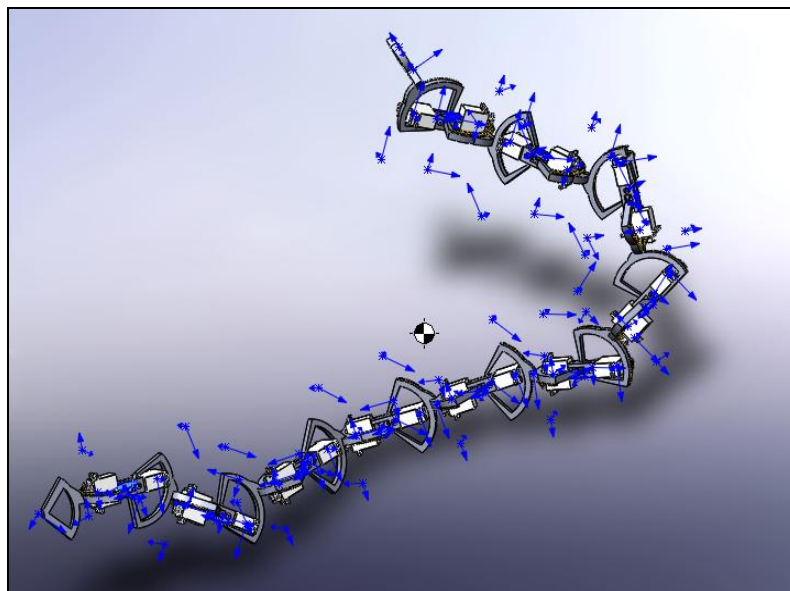


Рис.1. 3d модель конструкции змееподобного робота

Конструкция змееподобного робота собрана из набора однотипных звеньев, каждое из которых позволяет осуществлять перемещение (поворот) в двух ортогональных направлениях. 3d модель звена приведена на рисунке 2.

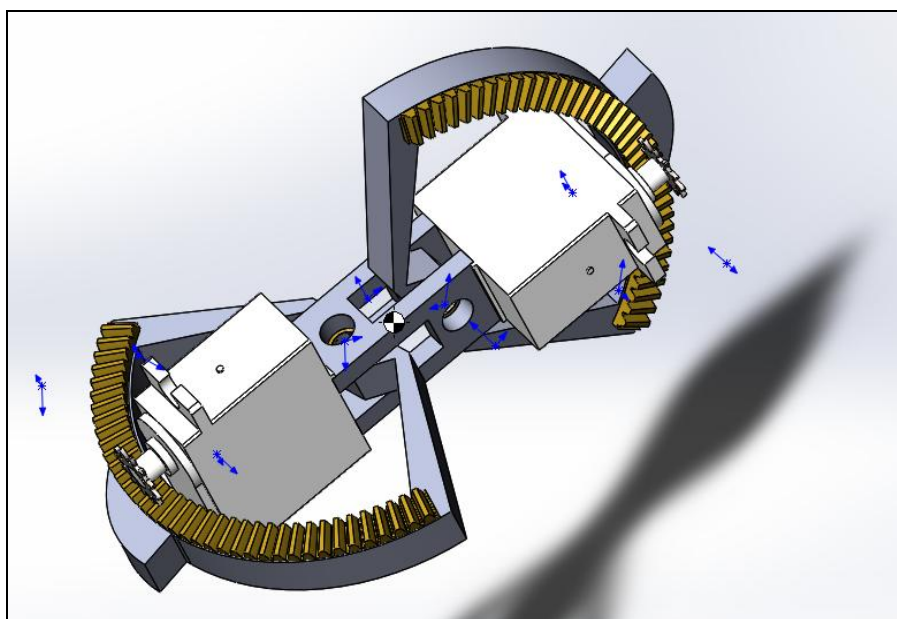


Рис.2. 3d модель звена

Для анализа механики используем метод уравнения Лагранжа второго рода [1,2,3]. Исследование звена змееподобного механизма производится в обобщенных координатах, при помощи которых можно определить в каждый данный момент положение этой системы и через которые, следовательно, можно выразить декартовы координаты всех точек. Число k независимых обобщенных координат равно числу степеней свободы данной системы. В соответствии с числом независимых обобщенных координат данной механической системы имеется для нее k уравнений Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j; \quad (j=1,2,...k), \quad (1)$$

где: T – кинетическая энергия системы;

Q_j – обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате q_j ;

$\dot{q}_j$ – обобщенная скорость.

Уравнения Лагранжа второго рода представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно неизвестных обобщенных координат $q_1, q_2, \dots, q_k$, описывающих движение механической системы, подчиненной идеальным связям [1,2,3].

Обобщенные силы можно вычислить посредством сообщения данной механической системе такое возможное перемещение, при котором изменяется только одна координата q_j , а все остальные обобщенные координаты остаются неизменными; затем составить сумму элементарных работ.

Найдём закон движения системы состоящей из зубчатого колеса, изготовленного из сплава БрАЖ, момент инерции которого равен $I = 8428,9$ г*мм² и основания $I_0 = 31\,4112,6$ г*мм², на котором установлена зубчатая рейка, изготовленная из сплава БрАЖ. Рейка жёстко закреплена на основании из дюралюминия. Основание вращается вокруг неподвижной оси OO' .

Прямозубое зубчатое колесо с внешним зацеплением приводится в движение сервоприводом. Он сообщает колесу момент силы M . (при напряжении $U=6$ В момент силы составляет 1Н*м, а при $U=4,8$ В, момент силы 0,85 Н*м). Посредством зацепления зубчатого колеса с зубчатой рейкой основание приходит в движение.

В начальный момент времени зубчатое колесо находится в покое. Момент силы трения между зубчатой рейкой и зубчатым колесом равен μM

(0,10-0,08 Н*м), где μ - коэффициент трения скольжения бронзы по бронзе (0,1-0,2).

Система движущихся тел имеет одну степень свободы, так как положение ее определяется одним параметром. Примем за обобщенную координату данной системы угол поворота зубчатого колеса, т. е. $q = \varphi$.

Так как рассматриваемая система имеет одну степень свободы, то будем иметь для нее одно уравнение Лагранжа второго рода.

На механизм действуют силы: вращающий момент - M приложенный к зубчатой рейке, и момент силы трения $M_c \approx \mu M$.

Чтобы найти обобщенную силу Q_φ , соответствующую обобщенной координате φ , сообщим системе возможное перемещение, т.е. дадим углу φ приращение $\delta\varphi$.

Составим сумму элементарных работ задаваемых сил и моментов на этом возможном перемещении. В данную сумму войдет работа вращающегося момента внешних сил M зубчатого колеса, и момента силы трения M_c .

$$\delta A_\varphi = M\delta\varphi - M_c\delta\varphi = (1 - \mu)M\delta\varphi. \quad (2)$$

Следовательно, обобщенная сила:

$$Q_\varphi = (1 - \mu)M. \quad (3)$$

Определим кинетическую энергию системы являющуюся функцией обобщенной координаты φ , и обобщенной скорости $\dot{\varphi}$, равной угловой скорости зубчатого колеса ω .

Кинетическая энергия системы равна:

$$T = T_1 + T_2, \quad (4)$$

где T_1 и T_2 – кинетическая энергия зубчатого колеса и основания соответственно, совершающие вращательное движение.

Кинетическая энергия для зубчатого колеса:

$$T_1 = \frac{I\dot{\varphi}^2}{2}, \quad (5)$$

где I – момент инерции зубчатого колеса относительно его геометрической оси.

Кинетическая энергия основания:

$$T_2 = \frac{I_0 W^2}{2}, \quad (6)$$

где I_0 - момент инерции основания относительно оси вращения OO'

W – угловая скорость вращения основания относительно оси OO'

Выразим угловую скорость W основания, через обобщенную скорость $\dot{\varphi}$.

$$V = WR$$

$$V = \varphi r, \quad (7)$$

где V – линейная скорость зубчатой рейки, а также зубчатого колеса.

R – расстояние от оси вращения OO' до зацепления зубчатой рейки и колеса (50мм).

r – радиус зубчатого колеса (12,5мм).

Тогда:

$$W = \frac{r}{R} \varphi. \quad (8)$$

С учётом предыдущего выражения, кинетическая энергия основания примет вид:

$$T_2 = \frac{I_0 r^2}{2R^2} \dot{\varphi}^2. \quad (9)$$

Кинетическая энергия системы:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{\left(I + I_0 \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \dot{\varphi}^2}{2} \quad (10)$$

Находим производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} &= \left(I + I_0 \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \dot{\varphi} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}}\right) &= \left(I + I_0 \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \ddot{\varphi} \\ \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= 0 \end{aligned}$$

Подставим эти выражения, а также значение Q_φ в уравнение Лагранжа:

$$\left(I + I_0 \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \ddot{\varphi} = (1 - \mu)M \quad (11)$$

$$\text{или} \\ \ddot{\varphi} = \frac{(1 - \mu)M}{\left(I + I_0 \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)} = const. \quad (12)$$

Интегрируя это уравнение дважды, получим:

$$\varphi = \frac{(1 - \mu)M}{\left(I + I_0 \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)} t^2 + C_1 t + C_2. \quad (13)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 находим из начальных условий: при $t=0$, $\varphi = 0$, $\dot{\varphi} = 0$. Следовательно, $C_1 = 0$ и $C_2 = 0$. Тогда закон движения системы:

$$\varphi = \frac{(1 - \mu)M}{\left(I + I_0 \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)} t^2 \quad (14)$$

где I_o - момент инерции основания относительно оси вращения OO'

I – момент инерции зубчатого колеса относительно его геометрической оси.

Знаменатель выражения зависит от геометрии, а также материала:

$$\left(I + I_o \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) = 28060 \cdot 10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (15)$$

После подстановки получим:

$$\varphi = \frac{0,9 \cdot 10^9 M}{28060} t^2. \quad (16)$$

Здесь учтено, что $\mu = 0,1$.

Зависимости угла поворота сервопривода от времени срабатывания для исследуемой конструкции (для трех различных сервоприводов) приведены на рисунке 3.

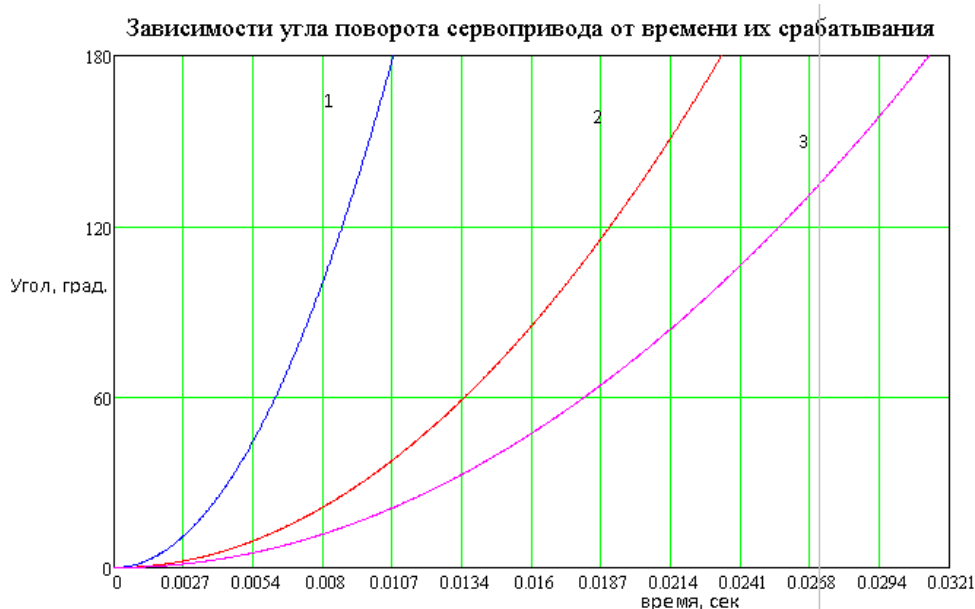


Рис.3. Время срабатывания звена робота – змеи для различных типов сервоприводов

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00612.

Список литературы

1. Артемов И. И., Плешаков В. Н., Елисеева А. А. Применение уравнений Лагранжа второго рода для решения задач динамики: метод. указания. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – 30 с.
2. Шахинпур М. Курс робототехники. Пер. с англ..- М.: Мир, 1990-527 с.
3. Нанано Э. Введение в робототехнику: Пер. с яп. – М.: Мир, 1988. – 334 с.

ВСТРАИВАЕМЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛИ НА ОСНОВЕ SMARC-МОДУЛЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ АУДИОВИЗУАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Аннотация: В данной работе представлены преимущества систем на модуле стандарта SMARC, основанных на ARM процессорах. Приведены основные технические характеристики стандарта и его интерфейсные возможности. Описана разработанная плата-носитель под модули данного стандарта, предназначенная для использования в робототехнических комплексах, а также представлены основные решения, позволяющие использовать данный вычислитель для обработки аудиовизуальных сигналов.

Ключевые слова: бортовой вычислитель, систем на модуле, SMARC, ARM

EMBEDDED COMPUTERS BASED ON SMARC MODULES FOR AUDIOVISUAL SIGNAL PROCESSING IN ROBOTIC SYSTEMS

V.Yu. Budkov, Ph.D., budkov@iias.spb.su
V.P. Dashevsky, Ph.D., vladimir.dashevsky@gmail.com
SPIIRAS, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: This paper present advantages of using SMARC standard for computer on module based on ARM processors and descriptions of it main specifications and interfaces. Carrier board for computer on module developed for robotic systems with capabilities for audiovisual signal processing is presented.

Key words: embedded computer, system on module, SMARC, ARM

Вычислительные системы робототехнических комплексов (РТК) имеют ряд характерных особенностей, отличающих их от иных встроенных систем. Они имеют ограниченные размеры, вес, энергопотребление. Обработка больших объемов информации в реальном времени в условиях мобильной

платформы усложняет процесс отладки основных алгоритмов. Поэтому естественно желание разработчиков повторно использовать проверенные аппаратные и программные решения.

В работе [1] показана целесообразность разделения бортовой вычислительной системы на две части: системный модуль и плату-носитель. Реализация системных модулей в соответствии с открытыми стандартами существенно ускоряет процесс разработки и позволяет повторно использовать компоненты, поддерживаемые широким сообществом разработчиков.

Стандарт системных модулей SMARC ориентирован на применение ARM-процессоров, технические характеристики которых хорошо сочетаются с требованиями к бортовым вычислителям РТК.

В настоящей работе рассмотрен вопрос применения SMARC модулей для создания бортовых вычислителей, ориентированных на решение задач машинного зрения и слуха.

Предлагаемая архитектура бортового вычислителя

В качестве тестового прототипа вычислительного модуля для разрабатываемого антропоморфного робота была спроектирована плата-носитель под модуль стандарта SMARC, блок-схема которой представлена на рисунке 1.

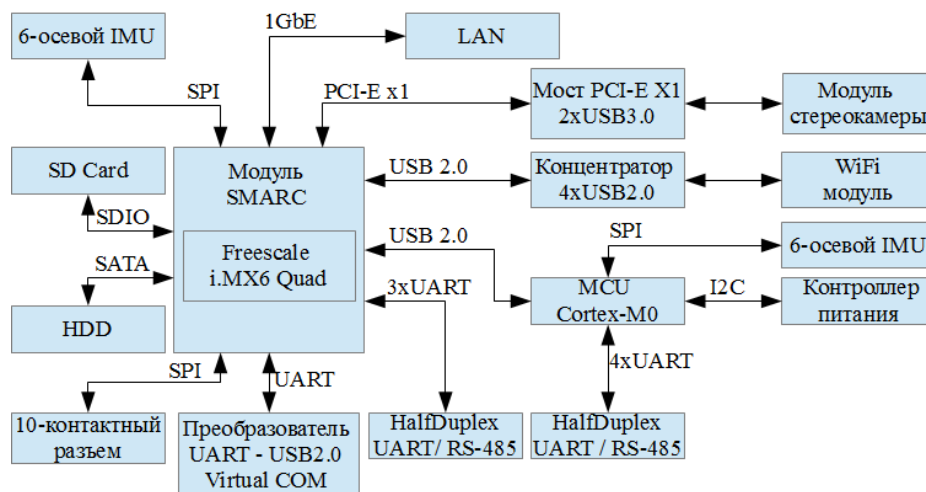


Рис. 1. Блок-схема вычислительного модуля

В качестве основного вычислительного модуля используется модуль SMARC-FiMX6-Q-1G-I-C от компании EMBEDIAN. Он оснащен процессором NXP (Freescale) i.MX 6 и 2 Гб оперативной памяти DDR3L. Данный процессор имеет четыре ядра, работающие на частоте в 1 ГГц каждое, и 3D видеоускоритель с поддержкой OpenCL. Для подключения к модулю при

первичном конфигурировании, а также для восстановления ОС на плате реализован UART-USB интерфейс, эмулирующий виртуальный COM-порт, который может быть подключен к root-консоли модуля. На плате предусмотрена возможность подключения стандартного SATA винчестера для создания базы аудио/видеозаписей высокого разрешения и большой длительности. Также для передачи больших объемов данных на внешний компьютер, например, для просмотра результатов работы системы, обрабатывающей видеосигнал в реальном времени, предусмотрен проводной 1 GigE интерфейс. В качестве беспроводного сетевого подключения предлагается использовать внешний USB WiFi адаптер, что уменьшит конечную стоимость вычислителя. На плате-носителе выведено 4 внешних USB 2.0 интерфейса и 2 USB 3.0 интерфейса, при этом на один из внутренних USB 2.0 интерфейсов подключен вспомогательный ARM микроконтроллер. Так как количество интерфейсов USB 2.0 увеличено с помощью хаба, то их общая пропускная способность ограничена, и они предназначены для подключения устройств, не требующих высокоскоростной передачи данных. Поддержка USB 3.0 отсутствует в стандарте SMARC и в большинстве недорогих ARM процессоров, поэтому он реализован через мост PCI-E x1. Высокая скорость передачи данных (от 2 Гбит/с) позволяет использовать данный интерфейс для получения несжатого видеопотока от камеры с высокой частотой кадров и/или высоким разрешением.

К SPI интерфейсу модуля и микроконтроллера подключены MEMS датчики движения, позволяющие отслеживать положение и перемещение робота в пространстве. За запись и воспроизведение сигналов отвечает аудио кодек, от которого выведены 4 разъема для подключения микрофонов, что позволяет разнести их по корпусу робота для определения положения источника звука и один выход на усилитель для подключения динамика. Для взаимодействия с приводами РТК на плате предусмотрено 7 UART интерфейсов, 3 из них подключены напрямую к системному модулю и 4 к вспомогательному микроконтроллеру. UART интерфейсы выведены на 10-контактные штыревые разъемы для подключения преобразователей из UARTa в полудуплексный UART и RS-485, необходимые для работы с различными цифровыми сервоприводами. Также на аналогичный разъем выведен дополнительный SPI интерфейс SMARC модуля для возможности подключения дополнительных устройств. В качестве бортового питания используется LiPo аккумулятор с 3 батареями. Встроенная в плату схема управления питанием, контролируемая по I2C вспомогательным микроконтроллером, позволяет работать системе от внешнего питания, от батареи, во время зарядки аккумулятора. Также система отслеживает сбалансированность заряда каждой батареи. Вспомогательный микроконтроллер отвечает за управление питанием модуля, первичную обработку нажатий кнопок, управления информационными светодиодами, а

также увеличивает количество доступных UART интерфейсов. Управление питанием через МК не дает батарее переразрядиться – оно позволяет не запускать процессор в отсутствии внешнего питания при минимальном заряде батареи, что увеличивает срок службы LiPo аккумуляторов. Данное решение также позволяет перезагружать систему без необходимости отключения аккумулятора в случае зависания основного вычислительного модуля. Обработка нажатий на кнопки микроконтроллером и подключение сервоприводов робота через его интерфейсы позволяет уменьшить энергопотребление системы за счет возможности управления базовыми движениями через программу, прошитую в МК. Общий вид разработанной платы представлен на рисунке 2.

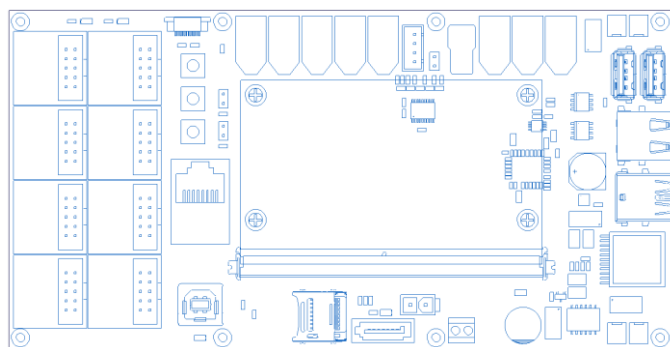


Рис. 2. Сборочный чертеж платы-носителя

Разработанная плата обладает возможностью подключения двух камер для реализации системы стереозрения и массива микрофонов, позволяющих локализовать источник звука и распознавать речевые команды. Для обеспечения возможности поиска некрупных и быстро движущихся объектов, а также слежения за ними, необходимо иметь возможность получать видеопоток с камер с высоким битрейтом [2]. Так видео с разрешением 640x480 и частотой 120 к/с от двух камер требует пропускную способность интерфейса около 2 Гбит/с. Из стандартных интерфейсов, используемых в модулях камер, такими характеристиками обладают CSI и USB 3.0. Предварительный обзор показал, что камеры подключаемые через CSI интерфейс зачастую имеют нестандартный разъем подключения, так как спецификация стандарта не определяет его. Также такие модули используют плоские шлейфы, что делает необходимым разработку и использование переходных плат на гибкие кабели при установке камер отдельно от бортового вычислителя. Поэтому в качестве интерфейса для подключения камер был выбран USB 3.0.

Обработка получаемого потока данных не может осуществляться только процессором, из-за его недостаточной вычислительной мощности. Поэтому для ускорения работы алгоритмов поиска и распознавания объектов предлагается использовать язык OpenCL, поддерживаемый встроенным 3D ускорителем, а также расширенный набор инструкций SIMD — NEON. В

работе [3] проведено сравнения скорости обработки изображений с использованием библиотеки OpenCV при автоматической и ручной векторизации кода. Результаты тестирования показали, что ручная оптимизация кода позволяет ускорить работу некоторых алгоритмов в 14 раз относительно автоматической. Библиотека компьютерного зрения OpenCV также имеет встроенную поддержку OpenCL, использование которого в стандартных функциях обработки изображений также может повысить скорость обработки данных в 2-5 раз.

Существуют примеры реализации систем распознавания аудиосигналов, речевых команд и слитной речи, например, в работе [4] представлена система CMU SPHINX-II, распознающая слитную речь в режиме реального времени на ARM процессоре без аппаратной поддержки вычислений с плавающей точкой и частотой в 206 MHz. Достаточно много работ посвящено проектированию систем распознавания речевых команд на микроконтроллерах. Работа [5] описывает архитектуру разработанной модели машинки, управляемой 16-битным процессором SPCE061A. Система распознает 4 команды направления движения и команду остановки. В компании Nuvoton разработан процессор ISD9160 на базе ядра ARM Cortex-M0, предназначенных для записи, воспроизведения аудио сигналов и позволяющих распознавать набора простых команд [6]. Процессор имеет низкое энергопотребления и имеют встроенный усилитель, позволяющий подключать микрофон напрямую к нему и осуществляет дикторонезависимое распознавание команд на 9 языках с диалектами.

В разработанном модуле за оцифровку потока данных с микрофонов отвечает аудиокодек от TI. Он имеет 10 входов и 7 выходов, которые могут быть сконфигурированы как сигналы с общей землей, так и дифференциальные. Входной аудиотракт процессора содержит источник тока смещения для микрофона, управляемый предусилитель, автоматический усилитель сигнала, а также позволяет смешивать сигналы из разных каналов. Поддержка 4 микрофонов с возможностью их произвольного размещения дает возможность применять различные алгоритмы пространственной локализации источника звука, основанные на оценке времени задержки прихода сигнала [7]. Алгоритмы выделения спектральных признаков из речевого сигнала зачастую основаны на быстром преобразовании Фурье. Использование инструкций NEON для реализации БПФ позволяет ускорить его расчет от 2 до 4 раз.

Разрабатываемые бортовые вычислители на основе SMARC-модулей планируется использовать для обработки аудиовизуальных сигналов в робототехнических комплексах, например для антропоморфных роботов-футболистов [8], а также встраиваемых средствах интеллектуального киберфизического пространства для проектирования систем с многомодальным интерфейсом, реализующих естественное взаимодействие

между пользователями и автоматическими сервисами [9,10], в том числе для бесконтактного определения биометрических показателей на основе обработки речевого сигнала и анализа других невербальных модальностей человеческого поведения. В дальнейшем запланирована программно-аппаратная реализация алгоритмов и программного обеспечения определения истинности передаваемого речевого сообщения на основе новых численных методов оценивания параметров речевого сигнала [11].

Исследование выполнено при частичной поддержке гранта РФФИ (16-37-60085) и гранта Президента Российской Федерации (МК-7925.2016.9).

Список литературы

1. В.П. Дашевский, М.М. Бизин. Обзор возможностей бортовых вычислителей на основе SMARC-модулей для робототехнических комплексов. // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 3(37) сентябрь 2015, С. 91 — 97.
2. YiGu Qing Review of Some Advances and Applications in Real-time High-speed Vision: Our Views and Experiences[J]. / YiGu Qing, Ishii Idaku // International Journal of Automation and Computing. – 2016. – 13(4). – P. 305-318
3. G. Mitra Use of SIMD Vector Operations to Accelerate Application Code Performance on Low-Powered ARM and Intel Platforms / G. Mitra, B. Johnston, A. P. Rendell, E. McCreath, J. Zhou // Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum (IPDPSW), 2013 IEEE 27th International. – 2013. – P. 1107-1116.
4. A.W. Black Pocketsphinx: A Free, Real-Time Continuous Speech Recognition System for Hand-Held Devices/ A.W. Black, A. Chan, D. Huggins-Daines, M. Kumar, M. Ravishankar, A.I. Rudnicky // ICASSP. – 2006. – P.185-188.
5. FAN L. et al. Design of intelligent speech control robot-car based on SPCE061A [J] //Electronics Instrumentation Customer. – 2004. – Т. 6. – С. 006.
6. Nuvoton Voice Recognition Solution [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.nuvoton.com/hq/applications/consumer/voice-recognition/?__locale=en
7. Ронжин А. Л. Особенности дистанционной записи и обработки речи в автоматах самообслуживания / Ронжин А. Л., Карпов А. А., Кагиров И. А. // Информационно-управляющие системы. 2009. №5 С.32-38.
8. Ронжин Ал.Л., Станкевич Л.А., Шандаров Е.С. Международные соревнования роботов по футболу RoboCup и перспективы участия в них российских команд // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 2 (7). С. 24-29.
9. Прищепа М.В., Будков В.Ю., Ронжин А.Л. Система интеллектуального управления мобильным информационно-справочным роботом // Информационно-управляющие системы. – 2010. № 6. С 2-6.
10. Создание «интеллектуального окружения» на пилотируемом космическом комплексе для позиционирования мобильного робота – помощника экипажа / Р.М. Юсупов, А.А. Карпов, Б.И. Крючков, А.Л. Ронжин, Л.Д. Сыркин, В.М. Усов // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», – 2013. – С. 397 422.
11. Вольф Д.А., Мещеряков Р.В. Модель и программная реализация сингулярного оценивания частоты основного тона речевого сигнала // Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 43. С. 191-209.

А. С. Горобцов, д.т.н., профессор, vm@vstu.ru
А. Е. Андреев, д.т.н., доцент, andan2005@yandex.ru
А. В. Скориков, студент, scorpion_energy@mail.ru
П. С. Тарасов, студент, tarasradio@mail.ru

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

УПРАВЛЕНИЕ ЛОКОМОЦИЕЙ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА В КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Аннотация: Рассматривается синтез управления шаговым перемещением антропоморфного робота, на основе метода обратной задачи. Приводятся законы управления для шагового перемещения андроида в квазистатическом режиме. Представлены экспериментальные результаты управления антропоморфным роботом AR-600E.

Ключевые слова: робототехника, шагающие роботы, управление

SYNTHESIS OF LOCOMOTION STEPPING AN ANTHROPOMORPHIC ROBOTIC SYSTEMS

A. S. Gorobtsov, Ph.D., professor, vm@vstu.ru
A. E. Andreev, Ph.D., andan2005@yandex.ru
A. V. Skorikov, student, scorpion_energy@mail.ru
P. S. Tarasov, student, tarasradio@mail.ru
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Abstract: The synthesis of control motion of walking robots, based on the inverse dynamics method. A description of the method for walking robots of various kinds was investigated. Presented theoretical and experimental results for robot android AR-600E.

Key words: robotics, CLAWAR, control

В работах [1-3] рассмотрено применение метода обратной задачи для синтеза управляемого движения роботов, в частности, антропоморфных роботов [3-4]. В настоящей работе рассматривается режим шагового перемещения человекоподобных роботов с небольшими скоростями, при которых теоретическая проекция центра масс (далее ц. м.) лежит на линии, соединяющей характерные точки стоп. Движение робота состоит из двух фаз — фазы переноса ц. м. с одной ноги на другую ногу и фазы стояния на ноге. Назовем такой режим движения квазистатическим.

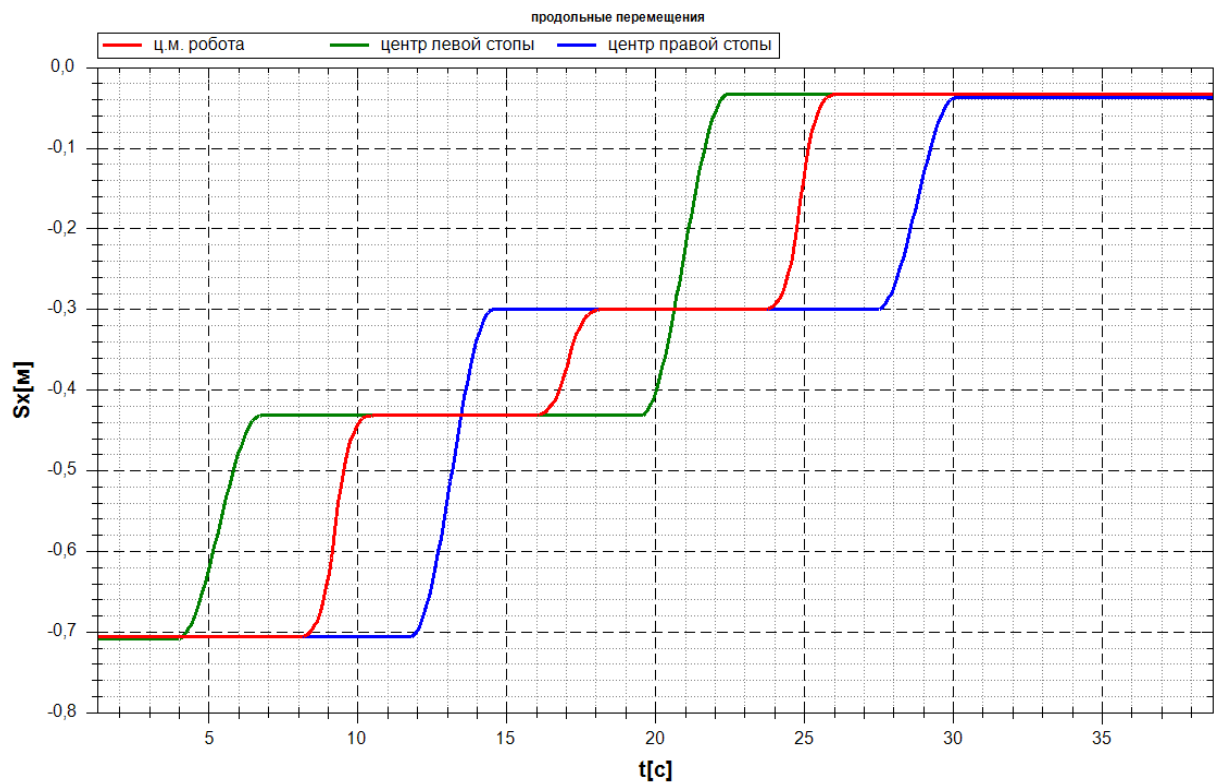


Рис. 1. Программное продольное перемещение ц. м. робота

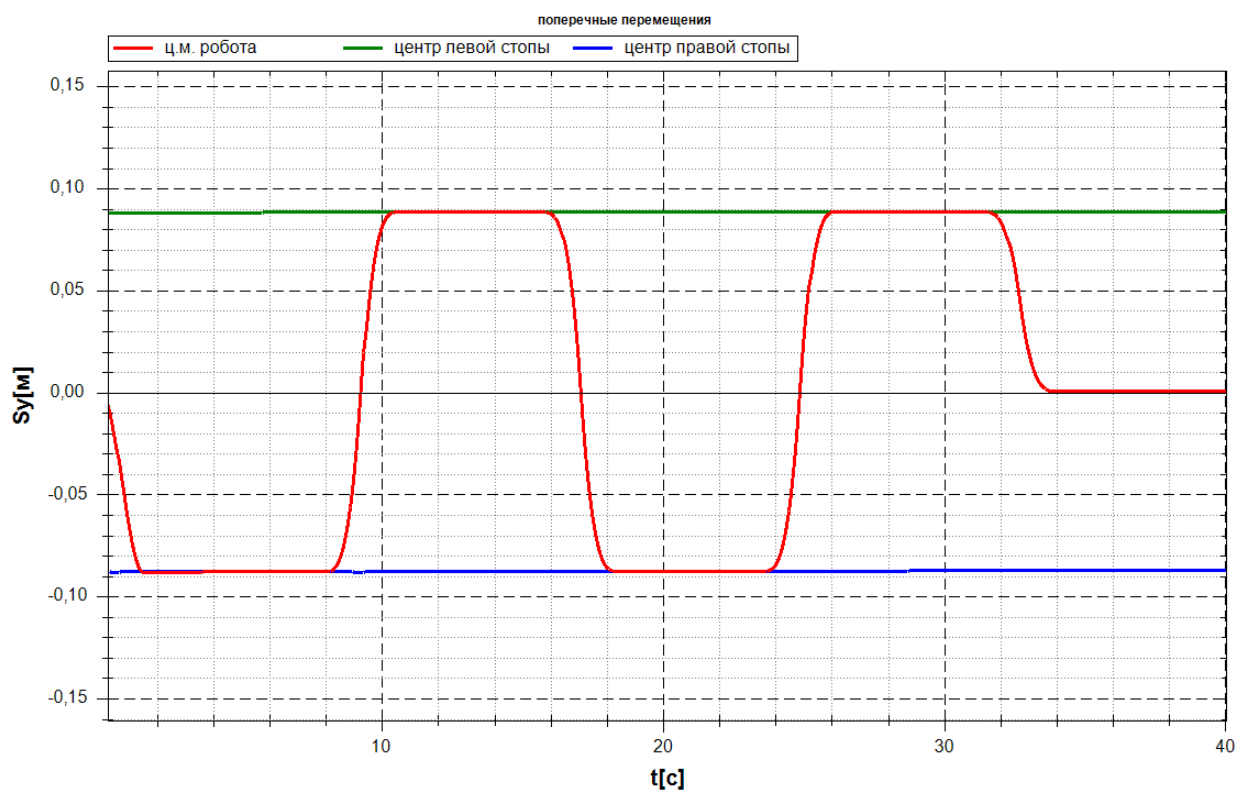


Рис. 2. Программное поперечное перемещение ц. м. робота

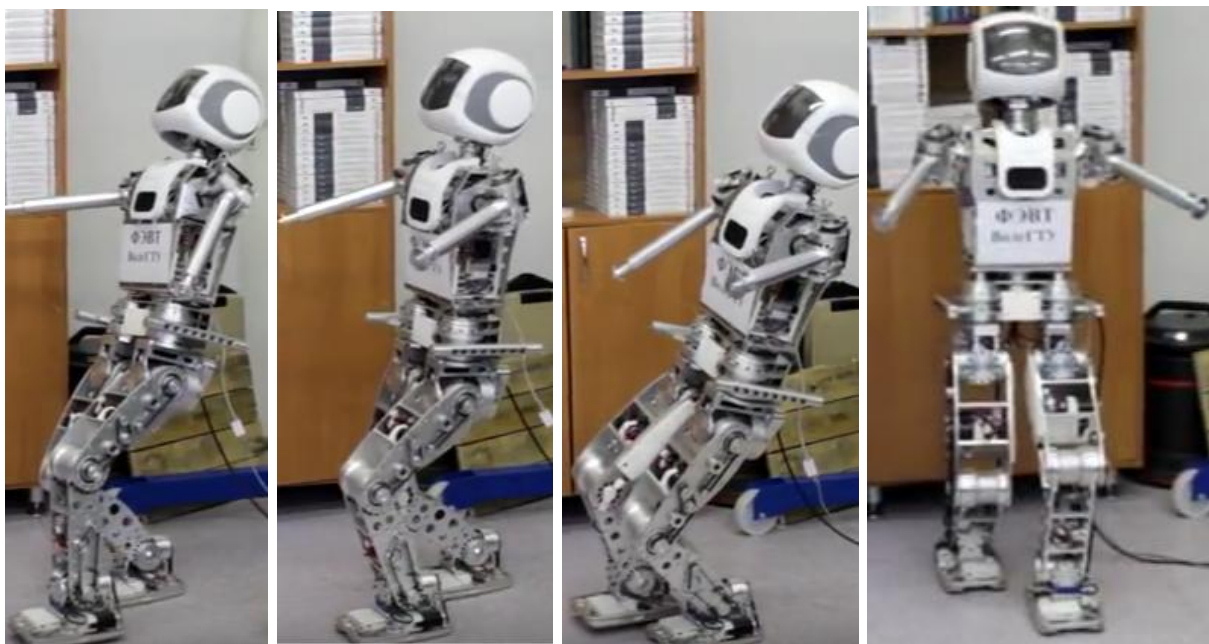


Рис. 3. Движение робота вперед
(frund.vstu.ru/volggtu-robot-android-ar-600-21-marta-2016/)

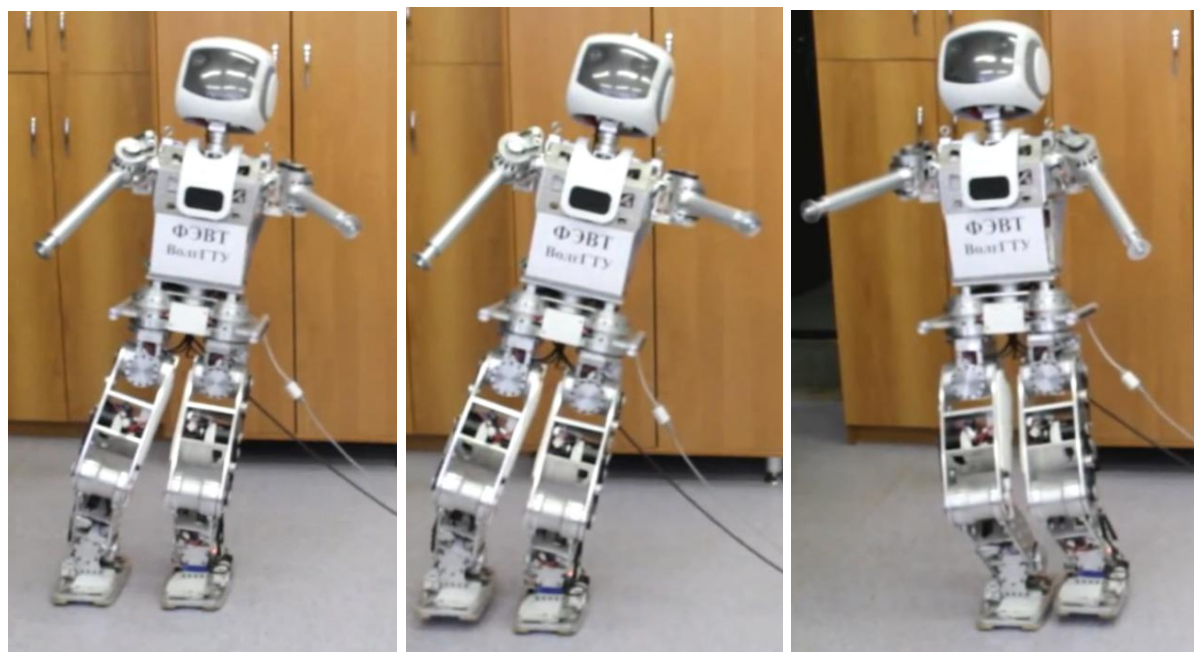


Рис. 4. Движение робота вбок
(<http://frund.vstu.ru/volggtu-robot-android-ar-600-22-marta-2016/>)

На рисунках 1 и 2 показаны графики перемещений проекции ц. м. робота в продольном и поперечном направлениях. Достижимые скорости при этом составили 3-4 см/с.

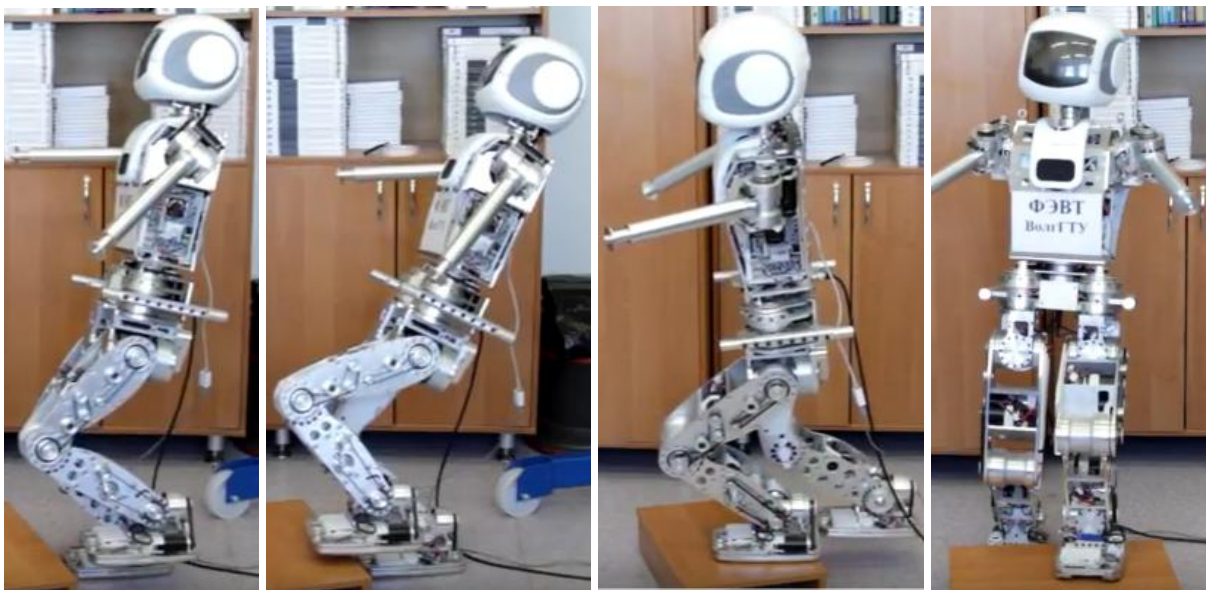


Рис. 5. Перешагивание робота через препятствие
(frund.vstu.ru/volggtu-robot-android-ar-600-preodolevaet-stupen-16-marta-2016/)

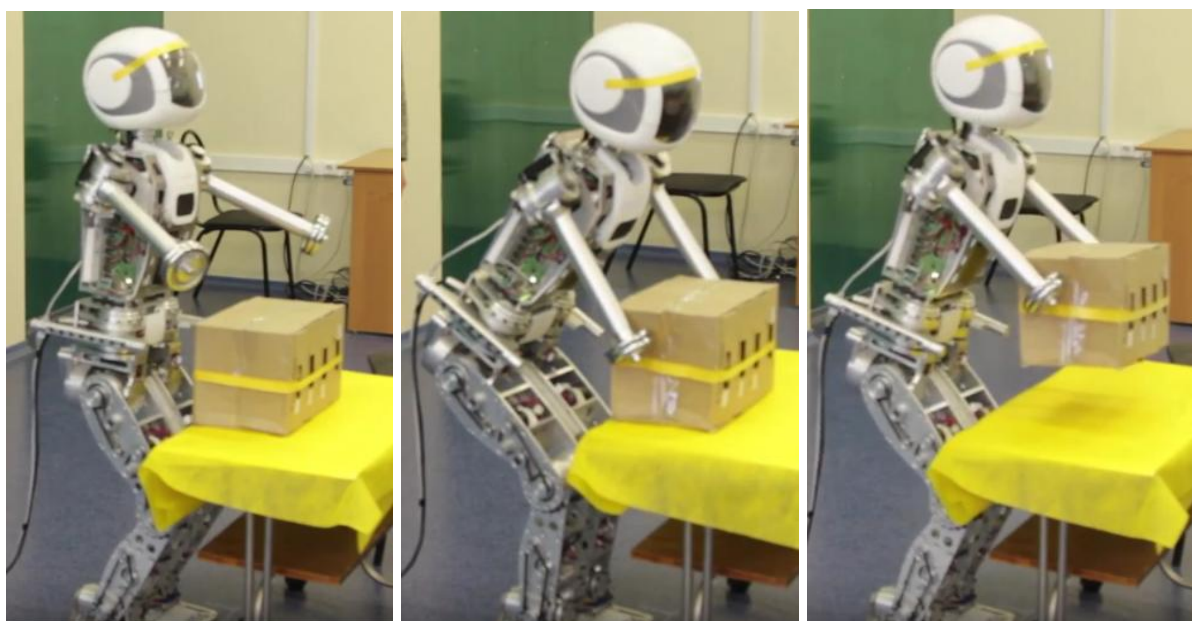


Рис. 6. Рабочее движение робота — поднятие груза
(<https://drive.google.com/drive/folders/0B8avOSHA0g4VbGp0b0RMZExVS28>)

На рисунках 3 и 4 показаны фрагменты движения робота прямо и вбок. Принцип квазистатического движения позволяет реализовать движение через ступеньку — рисунок 5 и различные рабочие операции, например, подъем груза — рисунок 6.

Таким образом, полученные алгоритмы управления могут быть использованы для создания функциональной модели робота андроида для

выполнения различных сервисных функций, не требующих больших скоростей движения.

Список литературы

1. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. – М.: Наука, 1988. – 328 с.
2. Vukobratovic M., Borovac B. Biped locomotion dynamics, stability, in: Control and Application, Springer-Verlag, Berlin, 1990. – 349 p.
3. Горобцов А. С. Синтез локомоции шагания антропоморфного робота. // Робототехника и искусственный интеллект: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием [Электронный ресурс] – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – С. 8-12.
4. Горобцов А. С., Андреев А. Е., Тарасов П. С., Скориков А. В., Карцов С. К. Синтез устойчивых квазистатических режимов шагания антропоморфного робота // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – №6 (185). – 2016. –С. 75-76.

К.В. Кондратьев, инженер-конструктор, kkv@samy.ru
В.Н. Сергеевич, к.т.н. директор, svn@samy.ru
ООО НПП САМИ, г. Железнодорожск, Россия
В.В. Двирный, д.т.н. профессор, dvirnyi@mail.ru
АО ИСС им. ак. М. Ф. Решетнева, г. Железнодорожск, Россия

ЭФФЕКТ ГИСТЕРЕЗИСА В РАБОТЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО БИМОРФА

Аннотация: Рассмотрена задача проектирования автоматизированных и робототизированных систем, посредством использования пьезоактуатора. Описана модель преобразования колебательной энергии пьезоэлемента в крутящий момент дискового колеса. Приведены результаты практических экспериментов преобразователя усилия, в частности был выявлен эффект гистерезиса пьезокерамического биморфа. Существует возможность использования полученных результатов при решении различного рода задач мехатроники, в частности функционирование малогабаритных манипуляторов промышленных роботов, конвейерных установок и пр.

Ключевые слова: пьезодвигатель, пьезоактуатор, преобразование энергии, колебания, крутящий момент, гистерезис.

THE HYSTERESIS EFFECT IN THE PIEZOCERAMIC BIMORPH

K. V. Kondratyev, design-engineer kkv@samy.ru
V. N. Sergeevic, Ph.D. director svn@samy.ru
LTD SPE "SAMY", Zheleznogorsk, Russia
V. V. Dvirnyi, Ph.D. professor dvirnyi@mail.ru
JSC "ISS" ac. M. F. Reshetnev", Zheleznogorsk, Russia

Abstract: We examine the problem of development of automated systems and robototizirovannyh by using ptezoaktuato-ra. The model of the piezoelectric element converting vibrational energy into torque wheels. The results of practical experiments converter efforts, in particular has been identified hysteresis effect piezoceramic bimorph. It is possible is-use of the results in addressing various types of villas, mechatronics, in the above privacy functioning small-manipu lators industrial robots, conveyor systems and so forth.

Keywords: piezoengine, pezoaktuator, energy-gies transform vibrations, torque, giterezis.

В автоматизированных и робототизированных системах, используемых в различных областях народного хозяйства, часто встречается задача обеспечения контролируемой, дозируемой тяги в вертикальном и горизонтальном направлениях. Перемещение грузов, деталей и других мелкогабаритных объектов в означенных направлениях, является важной, актуальной задачей в мехатронике. В частных случаях, когда в роботах, автоматах, конвейерных машин не допускается использование подъемных узлов, основанных на электромагнитных устройствах, предлагается подъемный механизм на основе пьзоактуатора.

Двигатель построен с использованием пьезокерамического биморфа [1] и дискового колеса. Под термином биморф предполагается элемент, состоящий из двух тонких склеенных между собой пьезокерамических пластин с прокладкой между ними или без нее, склейка осуществляется с помощью эпоксидного компаунда или легкоплавкого припоя [2, 3]. Если конструкция консольно закреплена с одной стороны, то свободный конец совершает угловые перемещения [4]. Внешний вид пьезокерамического биморфа и принципиальная схема его подключения приведены на рисунке 1.

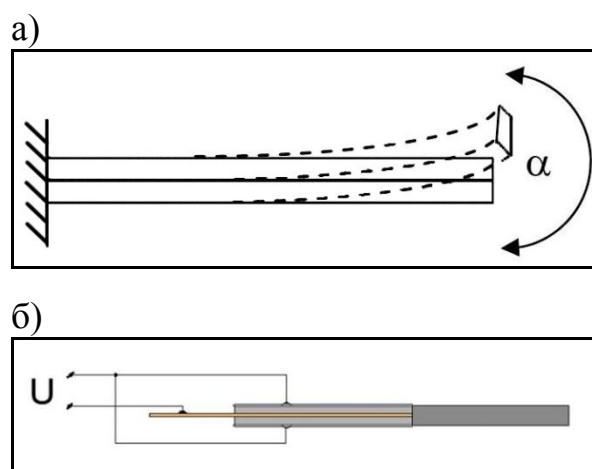


Рис. 1. Пьезокерамический биморф (а – изгиб конструкции биморфа, б – принципиальная схема подключения биморфа)

Создания крутящего момента предполагается с последующим его преобразованием в вертикальную тягу, имея, введу поднятие и опускание грузов различного номинала (кинематическая схема изображена на рисунке 2). Работоспособность представленной схемы устройства подъемного механизма подтверждена положительными результатами проведенных экспериментов.

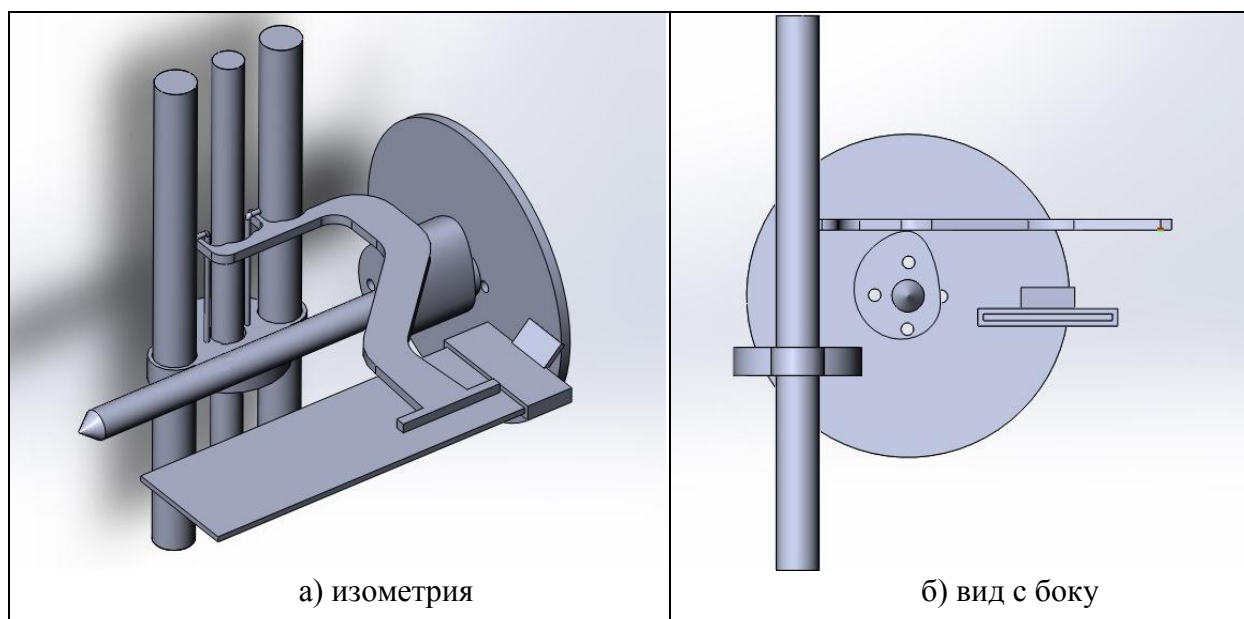


Рис. 2. Кинематическая схема преобразователя

На основе предложенного взаимодействия, ведущего и ведомого звеньев в виде пьезокерамического биморфа и дискового колеса, была разработана модель, посредством которой, осуществляется преобразование колебательных движений биморфа в плавное поднятие и опускание необходимого груза [5]. В основу модели лежит принцип [6], согласно которому все точки пьезоэлемента, входящие в контакт с ротором, должны двигаться по траектории описывающей эллипс, момент вращения ведомого звена образуется за счет трения между пьезоактуатором и ротором двигателя.

Целью еще одной серии экспериментов являлось исследование биморфа на возможность корректно управлять усилием его изгиба, посредством изменения, поданного на биморф напряжения. В кинематическую схему был включен высокоточный датчик, для измерения тяги биморфа. В результате проведенных лабораторных исследований и практических экспериментов было выяснено, что биморф, как генератор силы, обладает ярко выраженным гистерезисом. В данном случае гистерезис выражается в невозвращении биморфа в изначальное положение после прекращения подачи на него напряжения. На рисунке 3 приведена экспериментальная кривая, полученная в полном диапазоне допустимых напряжений на биморфе ЭП-9-47-ПлБ-001.

На графике видно, что первая ветвь биморфа (Ряд1) проходит по точкам, отличным от тех, которые далее с высокой точностью ложатся на классическую петлю гистерезиса (Ряд2 – Ряд5). Размах генерируемой биморфом силы при максимально допустимых напряжениях питания биморфа выбрано 42 В (при желании можно повысить почти в два раза) достигал порядка 12 гс.

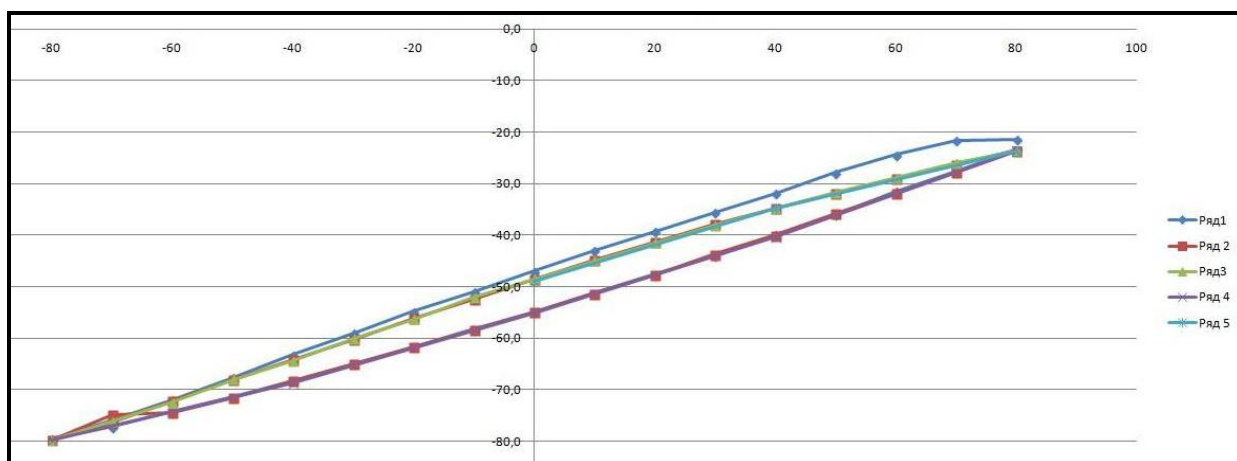


Рис. 3. Большая петля гистерезиса биморфа (OX – сила, регистрируемая датчиком силы, OY – напряжение на биморфе)

При более низких напряжениях ширина петли гистерезиса силы сужается (см. рисунок 4).

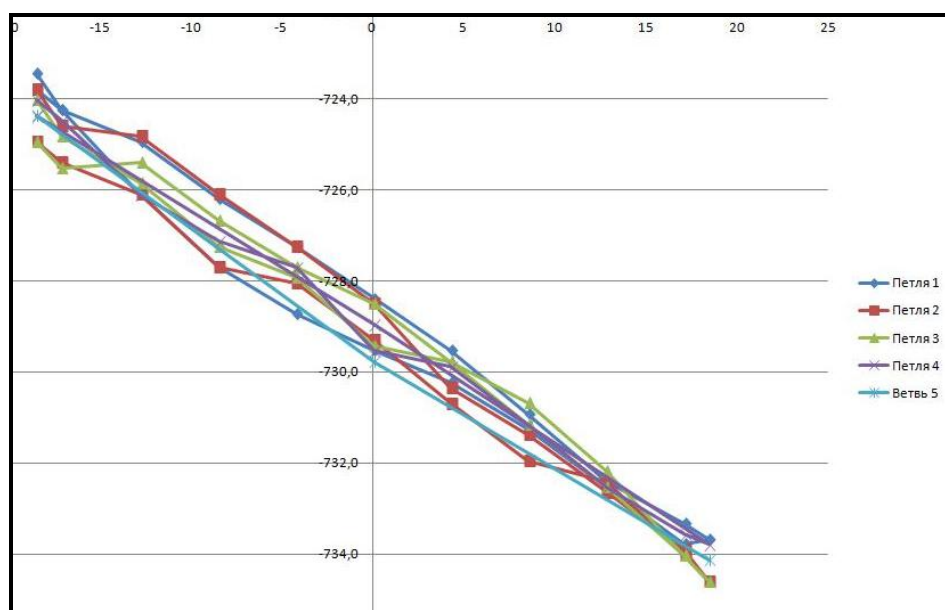


Рис. 4. Малая петля гистерезиса биморфа (OX – сила, регистрируемая датчиком силы, OY – напряжение на биморфе)

Однако для того что бы утверждать, что управление бимирфом относительно поданного на него напряжения линейно, ширина петли гистерезиса все же остается широкой. В связи с вышесказанным предлагается следующий алгоритм управления биморфом:

- выдать на биморф минимально возможное (Min) напряжение (биморф ослабит давление на датчик силы),

- подать выбранное напряжение (от 0 до Max), которое обеспечит заданную силу на датчике (такое двухступенчатое управление биморфом обеспечит нагружение датчика силы и воспроизводимость этого нагружения с точностью лучше, чем 1 гс),
- завершения работы с биморфом является процедура «парковки» (после калибровок необходимо перевести биморф в «нулевое» состояние путем нескольких колебаний напряжения на нем около нулевого значения с непрерывно падающей амплитудой).

Таким образом в задачах точного, высокопрецизионного приложения силы в системах с использованием пьезокерамического биморфа, предложенный алгоритм и результаты практических экспериментов позволяют существенно повысить точность прилагаемых усилий и уменьшить погрешность управления исполнительным устройством. Также существует возможность использования полученных результатов при решении различного рода задач мехатроники, в частности функционирование малогабаритных манипуляторов промышленных роботов, конвейерных установок и пр.

Список литературы

1. Азин А. В. Исследование микролинейных пьезопроводов для космических аппаратов / Азин А. В., Пономарев С. В., Рикконен С. В., Храмцов А. М. // Решетневские чтения: материалы XIX Междунар. науч. конф. Красноярск, 2015 Ч. 1. С. 58–59.
2. Софонов А. Я. Биморфные пьезоэлектрические элементы: актюаторы и датчики / Софонов А. Я., Никифоров В. Г., Климашин В. М. // Компоненты и технологии. Санкт-Петербург: изд. Файнстрит. 2003 №30. С. 46–48.
3. Бобцов А.А., В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2011. – 131 с.
4. Коржов А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебное пособие для самостоятельной работы студентов / А.В. Коржов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 70 с.
5. Кондратьев К.В. Особенности пьезодвигателей в условиях вакуума/ Кондратьев К.В., Сергеевич В. Н., Двирный В.В. // Решетневские чтения: материалы XIX Междунар. науч. конф. Красноярск, 2015 Ч. 1. С. 330–331.
6. Лавриненко В. В., Карташев И. А., Вишневский В. С. Пьезоэлектрические двигатели. / В. В. Лавриненко. – Москва: изд. "Энергия" 1980 г. – 112 с.

О.Н. Крахмалев, к.т.н., olegkr64@mail.ru
Д.И. Петрешин, д.т.н., доцент, atsys@tu-bruansk.ru
Г.Н. Крахмалев, аспирант, genakr73@mail.ru
А.Ю. Пимонов, аспирант, stservis12@mail.ru

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ ЦЕНТРА ИНСТРУМЕНТА ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Аннотация: Рассмотрены математические модели систем управления промышленных роботов, позволяющие выполнить калибровку центра инструмента, закрепляемого на установочном фланце робота. Процедуры по калибровке выполняются при оснащении промышленного робота новым инструментом. Калибровка инструмента выполняется в два этапа. Первый этап состоит в определении точки центра инструмента (ТЦР – Tool Center Point). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в ТЦР. Данная статья посвящена исследованию первого этапа калибровки инструмента.

Ключевые слова: промышленные роботы, калибровка инструмента, математические модели, системы управления

CALIBRATION METHODS THE TOOL CENTER POINT FOR INDUSTRIAL ROBOTS

O.N. Krahmalev, PhD, olegkr64@mail.ru
D.I. Petreshin, PhD, docent, atsys@tu-bruansk.ru
G.N. Krahmalev, graduate student, genakr73@mail.ru
A.Yu. Pimonov, graduate student, stservis12@mail.ru
Bryansk technical state university, Bryansk, Russia

Abstract: Mathematical models of industrial robots control systems that let you calibrate the tool center point fixed on the installation of the robot flange. Calibration procedures are carried out when equipping a new industrial robot tool. Instrument calibration is performed in two stages. The first step is to define the tool center point (TCP). The second step is to determine the orientation of the Cartesian coordinate system associated with the tool. The origin of this coordinate system is placed in the TCP. This article is devoted to the study of the first phase of the calibration tool.

Key words: industrial robots, tool calibration, mathematical models, control systems

Введение

Комплекс мероприятий по оснащению робота новым инструментом предусматривает выполнение процедуры калибровки этого инструмента перед его использованием в работе. Это необходимо для того чтобы система управления промышленного робота могла правильно выполнять перемещение инструмента в рабочем пространстве робота. Для этого математические модели, описывающие преобразования координат в данной модели робота, должны быть дополнены математической моделью сформированной для установленного инструмента. Математические модели, описывающие преобразования координат для инструмента создаются системой управления автоматически при выполнении процедуры калибровки инструмента перед вводом нового инструмента в эксплуатацию. Созданные математические модели сохраняются в постоянной памяти контроллера системы управления в библиотеке инструмента с указанием логического имени, присвоенного данному инструменту. В последующем при программировании движения промышленного робота системе управления указывается устанавливаемый на роботе инструмент путём присвоения специальному параметру логического имени выбранного инструмента. Процедура калибровки инструмента выполняется в два этапа. Первый этап состоит в определении точки центра инструмента (*TCP – Tool Center Point*). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в *TCP*. Данная статья посвящена исследованию первого этапа калибровки инструмента, а именно разработке математических моделей систем управления промышленных роботов, предназначенных для калибровки центра инструмента (*TCP*).

Промышленные роботы представляют собой многозвенные механические системы с последовательной структурой, звенья которых образуют друг с другом кинематические пары пятого класса и моделируются твёрдыми телами. Такие многозвенные механические системы называют манипуляционными системами. Пример манипуляционной системы промышленного робота *KUKA KR6 AGILUS*, имеющего шесть степеней подвижности, представлен на рис. 1. На рисунке изображены контуры звеньев и шарниры с указанием осей относительного вращения соединяемых ими звеньев. К последнему звену манипуляционной системы промышленного робота может быть жестко присоединён инструмент. Для этого в конструкции последнего звена предусматривается присоединительный фланец. На рис.1 присоединительный фланец изображен

в форме диска, внутри которого помещен шарнир, ось вращения которого перпендикулярна плоскости диска.

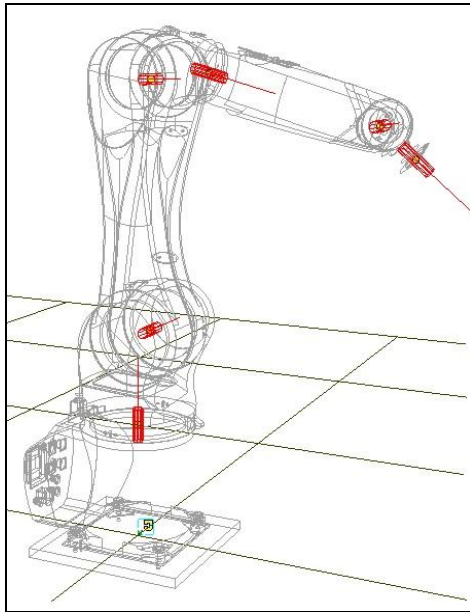


Рис.1. Манипуляционная система промышленного робота KUKA KR6 AGILUS

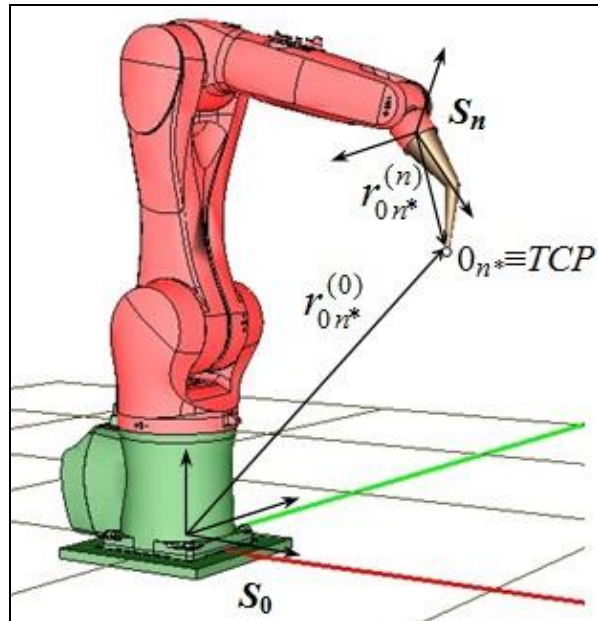


Рис.2. Системы координат $S_0 \equiv \text{WORLD}$, $S_n \equiv \text{FLANGE}$ и точка $0_n^* \equiv \text{TCP}$

Системы координат

Для описания относительного движения звеньев манипуляционных систем используют математические модели, обеспечивающие преобразование координат между системами координат, связываемыми с каждым звеном и системой координат, связываемой с неподвижным основанием. Существуют разные методы задания связанных со звеньями систем координат и построения математических моделей, обеспечивающих преобразования координат между ними, например, метод Денавита – Хартенберга [1], или метод двух связываемых с каждым звеном систем координат [2]. Не вникая в отличительные особенности предложенных методов достаточно отметить, что оба эти метода сводятся к составлению матриц, выполняющих преобразования однородных координат вида

$$A_{0,k} = A_{0,1} A_{1,2} \dots A_{(i-1),i} \dots A_{(r-1),k} = \prod_{i=1}^k A_{(i-1),i}, \quad k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где $A_{(i-1),i}$ – матрица размера 4×4 , выполняющая преобразование однородных координат из системы S_i , связанной с i -м звеном в систему $S_{(i-1)}$, связанную с $(i-1)$ -м, $A_{0,k}$ – матрица размера 4×4 , выполняющая преобразование однородных координат из системы S_k , связанной с k -м

звеном в систему S_0 , связанную с неподвижным основанием, n – количество звеньев в манипуляционной системе робота.

Для произвольной точки M , выбранной на k -м звене, матрицы преобразования однородных координат (1) позволяют получить простую форму математической модели, реализующей эти преобразования [2]

$$r_M^{(0)} = A_{0,k} r_M^{(k)}, \quad (2)$$

где $r_M^{(0)} = [x_M^{(0)} \ y_M^{(0)} \ z_M^{(0)} \ 1]^T$ – расширенный радиус-вектор точки M в неподвижной системе S_0 , $r_M^{(k)} = [x_M^{(k)} \ y_M^{(k)} \ z_M^{(k)} \ 1]^T$ – расширенный радиус-вектор точки M в связанной системе S_k .

В системах управления промышленных роботов неподвижную систему координат S_0 именуют *WORLD* и называют мировой системой координат. Начало системы координат S_n , связанную с конечным звеном, помещают в центр установочного фланца, а ось Z_n этой системы координат направляют перпендикулярно плоскости фланца вдоль оси его вращения. Систему координат S_n именуют *FLANGE*. Точку центра инструмента обозначают 0_{n*} и именуют *TCP*. Система координат $S_{n*} \equiv \text{TOOL}$ с началом в точке $0_{n*} \equiv \text{TCP}$, связывается с инструментом, присоединяемым к фланцу (рис. 2).

Методы калибровки TCP

На практике используется несколько методов калибровки центра инструмента (*TCP*): прямой вывод, калибровка базовым инструментом и метод двух подходов.

Прямой метод. По данному методу калибровки в систему управления вводят значения $(x_{0n*}^{(n)} \ y_{0n*}^{(n)} \ z_{0n*}^{(n)})$, являющиеся координатами точки $0_{n*} \equiv \text{TCP}$ в системе координат S_n . Задача может быть решена двумя способами (рис. 2).

Первый способ основывается на данных, полученных из конструкторской документации, в частности из 3D-модели калибруемого инструмента.

Второй способ является метрологическим и основывается на прямых измерениях. Поскольку при установке инструмента точка центра установочного фланца, являющаяся началом системы координат *FLANGE*, оказывается закрытой и недоступной для прямого измерения, то измеряются координаты $(x_{0n*}^{(0)} \ y_{0n*}^{(0)} \ z_{0n*}^{(0)})$, являющиеся координатами точки $0_{n*} \equiv \text{TCP}$ в неподвижной системе координат $S_0 \equiv \text{WORLD}$. Искомые координаты могут быть получены вычислением на основе математической модели полученной преобразованием выражения (2)

$$r_{0n*}^{(n)} = A_{0,n}^{-1} r_{0n*}^{(0)}. \quad (3)$$

Калибровка базовым инструментом. Данный метод позволяет выполнить калибровку нового инструмента на основе использования другого уже откалиброванного (базового) инструмента.

Последовательность действий:

1. На установочном фланце закрепляется ранее откалиброванный базовый инструмент.

2. Системе управления промышленного робота указывается логическое имя базового инструмента. Выполняется ввод данных о *TCP* базового инструмента.

3. *TCP* базового инструмента подводится к заостренному наконечнику, закреплённому в рабочем пространстве робота и в памяти контроллера системы управления сохраняются данные соответствующие значениям шарнирных координат.

4. Базовый инструмент отводится от наконечника и снимается. Устанавливается новый инструмент.

5. *TCP* нового инструмента подводится к тому же наконечнику и в памяти контроллера системы управления сохраняются данные соответствующие новым значениям шарнирных координат.

6. Выполняется расчёт данных для *TCP* нового инструмента. Данные сохраняются с указанием логического имени нового инструмента.

Математическая модель, обеспечивающая расчет данных для *TCP* нового инструмента по методу калибровки базовым инструментом может быть получена на основе рассмотрения уравнений, полученных на основе (2), для случая подвода к заостренному наконечнику *TCP* базового и нового инструментов (рис. 2).

Для базового инструмента в точке контакта его *TCP* с закрепленным наконечником может быть составлено уравнение

$$r_{0n*}^{(0)} = {}^{(1)}A_{0,n} {}^{(1)}r_{0n*}^{(n)}. \quad (4)$$

Для нового инструмента в точке контакта его *TCP* с закрепленным наконечником может быть составлено уравнение

$$r_{0n*}^{(0)} = {}^{(2)}A_{0,n} {}^{(2)}r_{0n*}^{(n)}. \quad (5)$$

Левые части уравнений (4) и (5) равны, так как представляю радиус-вектор одной и той же точки (острия наконечника) в неподвижной системе координат $S_0 \equiv WORLD$, следовательно, равны и правые части этих уравнений

$${}^{(1)}A_{0,n} {}^{(1)}r_{0n*}^{(n)} = {}^{(2)}A_{0,n} {}^{(2)}r_{0n*}^{(n)}. \quad (6)$$

Окончательно математическая модель для калибровки центра инструмента промышленных роботов по методу калибровки базовым инструментом будет иметь вид

$${}^{(2)}r_{0n*}^{(n)} = {}^{(2)}A_{0,n}^{-1} {}^{(1)}A_{0,n} {}^{(1)}r_{0n*}^{(n)}, \quad (7)$$

где ${}^{(2)}r_{0n*}^{(n)} = \begin{bmatrix} x_{0n*}^{(n)} & y_{0n*}^{(n)} & z_{0n*}^{(n)} & 1 \end{bmatrix}^T$ – расширенный радиус-вектор, содержащий координаты TCP нового инструмента в системе координат $S_n \equiv FLANGE$.

Метод двух подходов. По методу двух подходов TCP калибруемого инструмента дважды подводится к закреплённому наконечнику с разных сторон.

Последовательность действий:

1. На установочном фланце закрепляется калибруемый инструмент.
2. TCP калибруемого инструмента подводится к заостренному наконечнику, закреплённому в рабочем пространстве робота и в памяти контроллера системы управления сохраняются значения шарнирных координат соответствующих данному положению манипуляционной системы робота.
3. Инструмент отводится и снова поводится к наконечнику с другого направления. Сохраняются значения шарнирных координат, соответствующих новому положению манипуляционной системы робота.
4. Выполняется расчёт данных для TCP калибруемого инструмента. Данные сохраняются с указанием логического имени инструмента.

Математическая модель, обеспечивающая расчет данных для TCP калибруемого инструмента по методу двух подходов может быть получена на основе рассмотрения уравнений, полученных на основе (2), для двух случаев подвода TCP калибруемого инструмента к закреплённому наконечнику.

Для первого подхода

$$r_{0n*}^{(0)} = {}^{(1)}A_{0,n} r_{0n*}^{(n)}. \quad (8)$$

Для второго подхода

$$r_{0n*}^{(0)} = {}^{(2)}A_{0,n} r_{0n*}^{(n)}. \quad (9)$$

Разность уравнений (8) и (9) имеет вид

$$\left({}^{(2)}A_{0,n} - {}^{(1)}A_{0,n} \right) r_{0n*}^{(n)} = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) представляет собой математическую модель для калибровки центра инструмента промышленных роботов по методу двух подходов. Координаты TCP калибруемого инструмента в системе координат $S_n \equiv FLANGE$ могут быть определены численно, например, одним из методов решения систем линейных уравнений.

Метод двух подходов может быть повторён несколько раз, а полученные результаты усреднены. Это позволит снизить влияние ошибки, связанной с неточностью позиционирования TCP калибруемого инструмента на закреплённом наконечнике.

Заключение

В настоящей статье рассмотрены математические модели для калибровки центра инструмента (*TCP – Tool Center Point*) промышленных роботов, соответствующие методам наиболее распространённым в практике эксплуатации промышленных роботов. Полученные математические модели могут быть использованы в системах управления промышленных роботов. Близкие по данной теме вопросы рассмотрены в работах [3–10].

Исследование выполнено при финансовой поддержке БГТУ в рамках внутреннего гранта №135 на 2016г, выделенного на разработку программно-математического обеспечения моделирования и управления промышленными роботами и многокоординатными станками в рамках программы развития научного направления «Мехатроника и робототехника».

Список литературы

1. Шахинпур М. Курс робототехники. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
2. Крахмалев О.Н. Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов [Текст]+[Электронный ресурс]: монография. – Брянск: БГТУ, 2012. –200 с. (http://atechs.ru/wp-content/uploads/2014/02/МОНОГРАФИЯ-О.Н.-Крахмалев_испр.-и-доп..pdf).
3. Крахмалев О.Н. Точность управляемого движения промышленных роботов и многокоординатных станков: монография. – Брянск: БГТУ, 2015. – 236 с.
4. Крахмалев О.Н., Петрешин Д.И. Коррекция интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков // Мехатроника, автоматизация, управление. –2015. –Т16. –№7. –С. 491–496.
5. Крахмалев О.Н., Блейшмидт Л.И. Определение динамической точности манипуляционных систем роботов с упругими шарнирами // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. –№1. –С.29–36.
6. Крахмалев О.Н., Петрешин Д.И., Федонин О.Н. Метод построения геометрических моделей манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование, 2015. –№5(72). –С.34.
7. Крахмалев О.Н., Петрешин Д.И., Федонин О.Н. Методика параметризации геометрических (математических) моделей манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование, 2015. –№5(72). –С.35.
8. Крахмалев О.Н., Петрешин Д.И., Федонин О.Н. Метод коррекции интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование, 2015. –№5(72). –С.36.
9. Крахмалев О.Н., Петрешин Д.И., Федонин О.Н. Математическое обеспечение систем управления промышленными роботами и многокоординатными станками для коррекции влияния на их движение геометрических отклонений // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. –№3. – С.28–35.
10. Крахмалев О.Н. Математическое обеспечение управления манипуляционными роботами: монография // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2016. –113 с.

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СПС ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы построения адаптивной системы с переменной структурой и ограничениями управляющего сигнала, работающей в скользящем режиме, для решения задачи управления робототехническими объектами. Проанализированы особенности поведения системы при различных значениях коэффициентов закона управления и сформулированы новые условия существования скользящего режима. Определены параметры системы управления и метод адаптивной настройки коэффициентов регулятора, обеспечивающие ее максимально возможное быстроедействие и высокую динамическую точность.

Ключевые слова: система управления, робототехнический объект, система с переменной структурой, скользящий режим, адаптация

SYNTHESIS OF THE ADAPTIVE VSS FOR THE NON-STATIONARY ROBOTIC OBJECT WITH CONTROL SIGNAL SATURATION

A.V. Lebedev, Ph.D., lebedev@dvo.ru
Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, Russia

Abstract: The construction of adaptive variable structure system with sliding mode and control signal saturation in a task of robotic object control is considered in this paper. The features of system behaviour at different values of control law coefficients are analyzed and the new conditions of a sliding mode existence are formulated. The control system parameters and the method of regulator coefficients adaptive adjustment ensuring the greatest possible fast-action and high dynamic precision are determined.

Key words: control system, robotic object, variable structure system, sliding mode, adaptation

Одной из важнейших научных проблем современной робототехники является создание, теоретическое и экспериментальное обоснование новых

высокоэффективных подходов и методов синтеза иерархических систем управления (СУ) сложными робототехническими и мехатронными объектами и комплексами, функционирующими в условиях неопределенных и изменяющихся параметров, неконтролируемых внешних воздействий и априорно неизвестной окружающей обстановки, а также при наличии ограничений управляющих сигналов.

В представленной статье в рамках решения указанной общей проблемы рассматриваются вопросы, связанные с построением высококачественных систем управления нижнего (исполнительного) уровня иерархии, обеспечивающих точное и максимально быстрое движение роботов по сложным пространственным траекториям (сформированным на верхних иерархических уровнях) в процессе выполнения ими ответственных миссий или технологических операций.

Решение задачи создания таких СУ роботами предлагается осуществлять с использованием подходов теории робастных и адаптивных систем управления, в частности, систем с переменной структурой (СПС) [1,2]. Как показывают результаты многочисленных исследований, СПС позволяют эффективно решать задачи управления сложными робототехническими и мехатронными объектами [3-7]. Организация в таких системах скользящего режима позволяет обеспечить робастность в условиях неопределенности и переменности параметров объекта управления (ОУ) и существенного внешнего влияния со стороны окружающей среды [8,9]. Однако известные условия существования этого режима справедливы лишь при отсутствии ограничений на управляющие сигналы.

Наличие таких ограничений обуславливает ряд особенностей в поведении СПС. В частности, устойчивый скользящий режим, а значит, и асимптотическая устойчивость состояния равновесия и, тем более, отсутствие колебаний в переходном процессе не могут быть в этом случае обеспечены при определенных комбинациях начальных условий и параметров ОУ. В результате не гарантируется робастность системы управления и значительно снижается качество ее функционирования.

Кроме того, в традиционных СПС с целью обеспечения их робастности регуляторы всегда настраиваются на так называемые «наихудшие» (с точки зрения обеспечения условий существования скользящего режима) параметры объекта управления. Как следствие, такие системы имеют заведомо заниженное быстродействие в большинстве режимов работы, в которых эти параметры отличаются от «наихудших».

В связи с этим основной целью статьи является детальное исследование системы с переменной структурой при наличии ограничений управляющих сигналов и получение модифицированных условий существования скользящего режима и соотношений для вычисления коэффициентов СПС-регуляторов, обеспечивающих максимально возможное

быстродействие системы управления, а также разработка на основе этих условий нового метода адаптивной подстройки параметров линии скольжения в СПС без идентификации изменяющихся параметров объекта.

Для решения указанных задач далее используем подход, связанный с построением децентрализованной СУ пространственным движением робототехнического объекта на основе его упрощенной математической модели, полученной методом декомпозиции. При этом каждый канал управления будем рассматривать как сепаратную подсистему второго порядка, для которой синтезируется СПС-регулятор, обеспечивающий робастность по отношению к изменяющимся параметрам объекта.

В ряде достаточно распространенных случаев (движение мобильного робота в вязкой среде по одной из пространственных координат и т.д.) поведение объекта управления (в каждом канале такой децентрализованной СПС) может быть описано дифференциальным уравнением второго порядка следующего общего вида:

$$\ddot{x} + a\dot{x} = bu, \quad (1)$$

где a и b – параметры объекта, которые могут принимать любые значения внутри заданных диапазонов, определяемых интервальными неравенствами, $x = x(t)$ – координата состояния объекта, $u = u(t)$ – управляющее воздействие.

Будем полагать, что это управляющее воздействие u ограничено по модулю величиной $u_{\max}$, т.е. его зависимость от сигнала u^* , вырабатываемого устройством управления, определяется следующим образом:

$$u = \begin{cases} u^*, & \text{если } |u^*| \leq u_{\max}, \\ u_{\max} \operatorname{sign}(u^*), & \text{если } |u^*| > u_{\max}. \end{cases} \quad (2)$$

В качестве цели управления примем обеспечение асимптотической устойчивости состояния $x = 0$, $\dot{x} = 0$. Практически это означает плавную остановку системы в положении равновесия без перерегулирования.

При отсутствии ограничений на управляющий сигнал u ($u = u^*$) поставленная цель может быть достигнута при любых значениях a и b из заданных диапазонов путем формирования в классе СПС закона управления вида $u^* = -k_u |x| \operatorname{sign}(s)$, где $s = \dot{x} + k_s x$ – линейная комбинация переменной x и ее производной, k_u и k_s – коэффициенты управляющего устройства. При этом должно быть обеспечено выполнения условия существования скользящего режима $s\dot{s} < 0$ [1,2] за счет выбора параметров СПС-регулятора k_u и k_s в соответствии с неравенством $k_s < k_g = (a + \sqrt{a^2 + 4bk_u})/2$, где k_g – вспомогательный коэффициент.

Теперь исследуем влияние ограничений на процессы в СПС. Для этого, комбинируя приведенные выше выражения, получим закон изменения управляющего сигнала u в СПС с ограничением:

$$u = \begin{cases} -k_u x \operatorname{sign}(sx), & \text{если } |x| \leq u_{\max}/k_u, \\ -u_{\max} \operatorname{sign}(s), & \text{если } |x| > u_{\max}/k_u. \end{cases} \quad (3)$$

Построим фазовый портрет рассматриваемой системы в координатах x и $y = \dot{x}$, получив предварительно уравнения фазовых траекторий системы (1), (3) в областях (I) и (II) фазовой плоскости, разделенных прямыми переключения l_1 , l_2 , y и s с уравнениями $x = -u_{\max}/k_u$, $x = u_{\max}/k_u$, $x = 0$ и $s = 0$ (т.е. $y = -k_s x$), соответственно (см. рис.).

Проведенный анализ фазового портрета СПС с ограничениями (рис.) позволяет сделать вывод о том, что имеются такие комбинации значений a , b , k_u , k_s , $u_{\max}$ и x_0 , при которых устойчивый скользящий режим в системе (1), (3) существует не на всей прямой s , а лишь на некотором ее отрезке PP_1 или даже BB_1 , и, как следствие, переходный процесс может иметь немонотонный (с перерегулированием) или колебательный характер.

В статье получены важные соотношения между этими параметрами, представляющие собой условия реализации тех или иных вариантов переходных процессов в СПС с ограничениями.

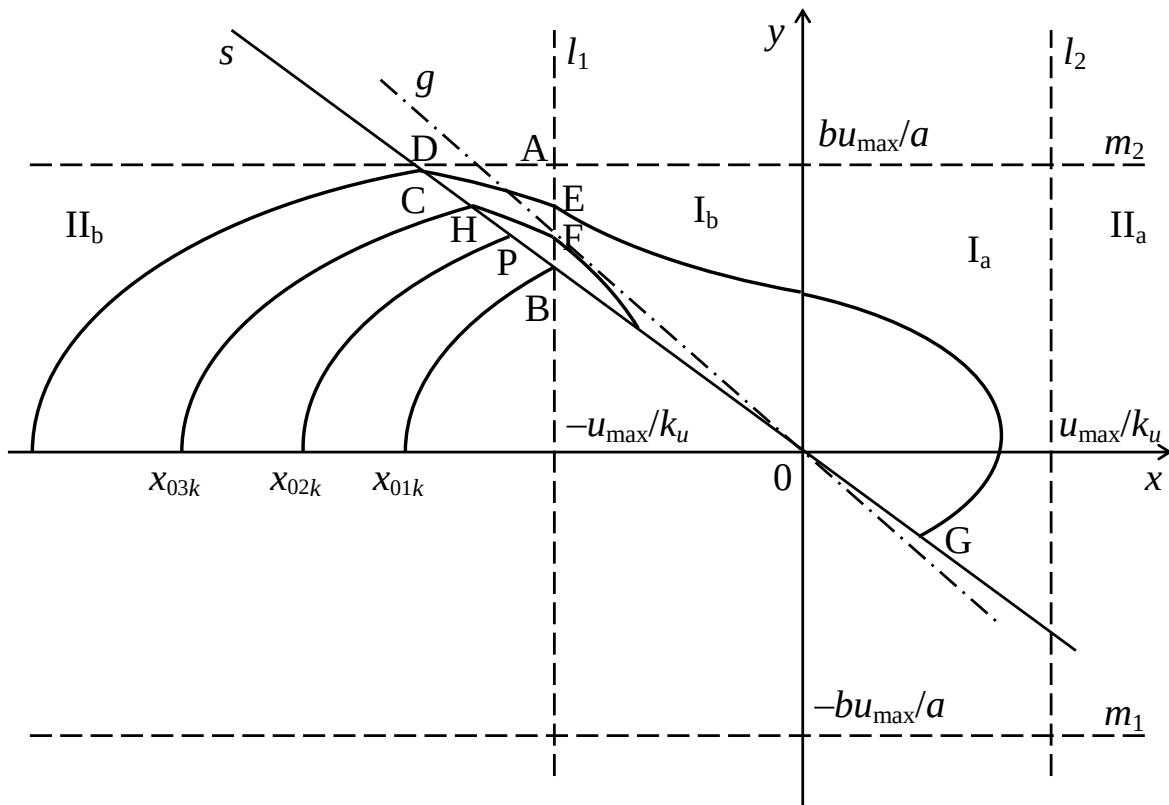


Рис. Фазовый портрет СПС с ограничением управляющего сигнала

В частности, необходимое и достаточное условие существования скользящего режима на всем отрезке BD имеет вид $k_s < 2a$, а условие отсутствия перерегулирования эквивалентно неравенству:

$$k_s < k_{sk} = \frac{bk_u}{a - k_g + \frac{bk_u}{a} \left(1 + \ln \frac{1}{2} \left(\frac{ak_g}{bk_u} + 1 \right) \right)}. \quad (4)$$

Таким образом, срыв скользящего режима в области (II) из-за влияния ограничений возможен только при $k_s > 2a$, а при нарушении условия (4) переходный процесс, очевидно, будет происходить с перерегулированием (а при достаточно больших значениях k_s и с колебаниями).

С учетом полученных выше выражений, определяющих закон управления при наличии ограничений управляющего сигнала, задача синтеза СПС-регулятора сводится к определению значений коэффициентов k_u и k_s , обеспечивающих достижение поставленной цели управления для любого x_0 , т.е. выполнение условий:

- отсутствие перерегулирования в течение переходного процесса;
- возникновение на завершающей стадии переходного процесса устойчивого скользящего режима для плавного подхода системы к положению равновесия независимо от параметров объекта управления;
- максимально быстрый выход на прямую скольжения и движение в скользящем режиме с максимально возможной скоростью.

Принимая во внимание выражение (4), нетрудно определить, что для одновременного выполнения всех трех условий достаточно при заданном k_u выбрать наибольшее возможное значение коэффициента k_s в соответствии с неравенством $2a < k_s < k_{sk}$.

Отметим, что все приведенные выше рассуждения справедливы при некоторых заданных, наихудших с точки зрения обеспечения условий существования скользящего режима параметрах ОУ, для которых и производится расчет постоянного значения k_s в соответствии с неравенством (4). Как следствие, в СПС имеется резерв для увеличения быстродействия в тех режимах работы, в которых эти параметры отличаются от наихудших.

В связи с этим в статье предлагается ввести в СПС-регулятор элементы адаптивной настройки, обеспечивающей автоматическое увеличение величины k_s в процессе работы системы до максимально возможной величины k_{sk} , при которой не нарушаются указанные выше требования.

Техническая реализация указанной настройки, не требующей идентификации параметров объекта, возможна на основе метода, описанного, например, в [7] (для СПС без ограничений на управление). Однако в рассматриваемом случае (при наличии ограничений управляющего сигнала) значение так называемого параметра скольжения, используемого в качестве индикатора сохранения скользящего режима, должно быть ограничено не единицей, а некоторой меньшей величиной, подобранной таким образом, чтобы по окончании процесса настройки коэффициент k_s не превышал критическое значение k_{sk} .

Результаты проведенного численного моделирования подтвердили справедливость полученных теоретических выводов, а также работоспособность предложенного закона адаптивной настройки.

Таким образом, в статье проанализированы особенности поведения СПС с ограничениями управляющих сигналов, работающей в скользящем режиме, при различных значениях коэффициентов закона управления. Сформулированы новые условия существования скользящего режима в заданных областях фазовой плоскости с учетом указанных ограничений. Определены параметры СУ и предложен метод адаптивной настройки коэффициентов СПС-регулятора, обеспечивающие максимально возможное быстродействие системы и высокую динамическую точность при любых изменениях параметров ОУ без их идентификации. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании сложных робототехнических и мехатронных объектов различного вида и назначения. Они позволяют существенно повысить качество функционирования систем управления такими объектами, придать им новые свойства и функциональные возможности и расширить область их практического применения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке комплексной программы фундаментальных исследований «Дальний Восток» (проект №15-I-4-048).

Список литературы

1. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 336 с.
2. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. – М.: Наука, 1981. – 368 с.
3. Sugiki A., Furuta K., Ohata A., Nita H. Nonlinear Variable Structure Adaptive Control // Proceedings of American Control Conference, Portland, OR, 2014. – pp. 1298-1303.
4. Lebedev A.V., Filaretov V.F. The Synthesis of Multi-Channel Adaptive Variable Structure System for the Control of AUV // Proceedings of The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, Nice, France, 2008. – pp. 2834-2839.
5. Lai C.K., Shyu K.K. A Novel Motor Drive Design for Incremental Motion System via Sliding-Mode Control Method // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 2. – № 52. – 2005. – pp. 499-507.
6. Liang Y.-W., Xu S.-D., Chu T.-C. Robust Control of the Robot Manipulator via an Improved Sliding Mode Scheme // Proceedings of The IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, Vol. I, 2007. – pp. 1593-1598.
7. Филаретов В.Ф., Алексеев Ю.К., Лебедев А.В. Системы управления подводными роботами. – М.: Круглый год, 2001. – 288 с.
8. Rubagotti M., Ferrara A. Second Order Sliding Mode Control of a Perturbed Double Integrator with State Constraints // Proceedings of American Control Conference, Baltimore, MD, 2010. – pp. 985-990.
9. Lian J., Hu J., Zak S.H. Adaptive Robust Control: A Piecewise Lyapunov Function Approach // Proceedings of American Control Conference, St. Louis, MO, 2009. – pp. 568-573.

ПРОБЛЕМА ИЗЛИШНЕГО КОЛИЧЕСТВА СТЕПЕНЕЙ ПОДВИЖНОСТИ В РОБОТЕ-ШАРЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ЧЕТЫРЬМЯ ОПОРАМИ

Аннотация: В статье рассматривается робот-шар параллельной структуры с четырьмя опорами. При помощи формулы Сомова-Малышева производится расчет степени подвижности рабочего органа робота. Показано, что она является избыточной. На основании того, что это приводит к трудностям в управлении движением, ставится задача удаления лишних степеней свободы в шарнирах. Исходя из практических соображений и анализа соотношений осей шарниров предлагаются конкретные варианты способов решения задачи. В заключение, описывается реализация робота-шара с одинаковыми опорами, использующая механизм ограничения степеней свободы универсального шарнира.

Ключевые слова: робототехника, шарообразные роботы, параллельная кинематика, параллельные механизмы, энергоэффективные роботы, избыточная подвижность

PROBLEM OF EXCESS DEGREES OF FREEDOM IN PARALLEL SPHERICAL ROBOT WITH FOUR LEGS

I.V. Podmazov, podmazov@gmail.com

United Institute of Informatics Problems of NAS of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract: The article deals with a parallel structure spherical robot with four legs. The degree of mobility of the working body of the robot is calculated using the Somov-Malyshev formula. Then, the mobility is shown to be excess. Based on the fact that this leads to movement control difficulties, the objective of removing the extra degrees of freedom in the joints is set. On the assumption of the practical considerations and axes directions analysis specific options are suggested on how to meet the objective. Finally, a spherical robot with the identical legs is described, which uses the mechanism for restricting the degrees of freedom of the universal joint.

Key words:robotics, spherical robots, parallel kinematics, parallel mechanisms, energy efficient robots, excess mobility

Введение

Шарообразные роботы являются перспективным видом роботов, обладающим рядом преимуществ перед другими конструкциями. В данной статье рассматривается кинематика робота-шара, предложенного в [1, 2]. Указанная конструкция шарообразного робота реализует идею, что практически вся масса робота, кроме его оболочки, должна участвовать в управлении смещением центра масс. Фактически, данный робот является механизмом параллельной структуры конфигурации 4-SPU, причём сферические шарниры находятся на корпусе (рис. 1).

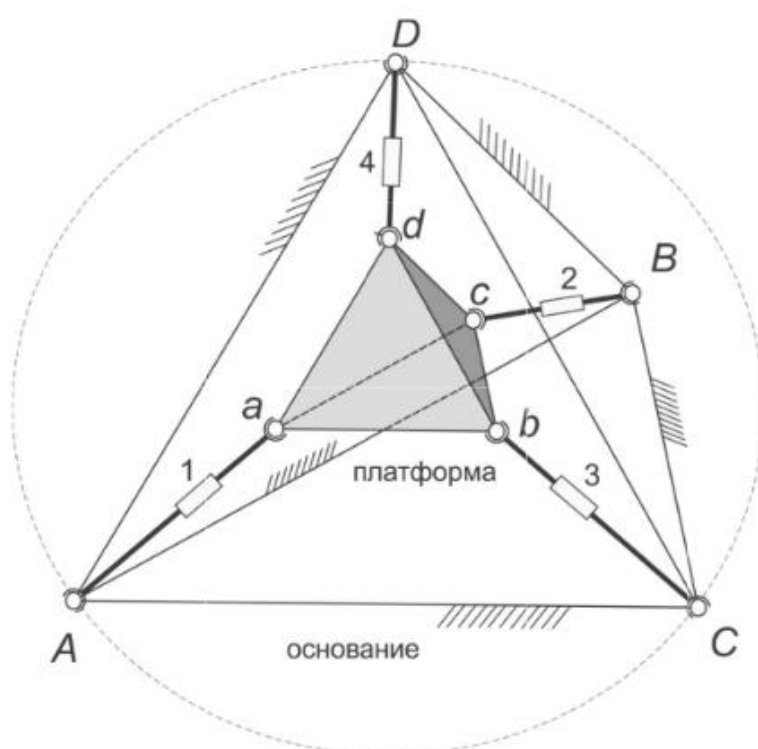


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции робота-шара на основе параллельного механизма

Уже разработаны и известны конструкции параллельных манипуляторов с тремя поступательными степенями подвижности рабочего органа. Примеры таких манипуляторов – трипод и гексапод. Однако, для применения в роботе-шаре, трипод не удовлетворяет требованиям по жесткости конструкции, а гексапод – не оптимален по энергетическим затратам и сложности конструкции. Экономное использование энергии является одним из наиболее желаемых качеств вновь создаваемых конструкций роботов [3]. Компромисс между жесткостью и

энергоэффективностью/сложностью конструкции заключается в использовании четырёх опор.

Подобный робот-шар оптимален по указанным характеристикам, но обладает специфическим недостатком – избыточной степенью подвижности рабочего органа, что приводит к возникновению неконтролируемых системой управления колебаний во время движения.

Подвижность рабочего тела робота-шара с четырьмя опорами

Степень подвижностиманипулятора в данном случае может быть вычислена по формуле Сомова-Малышева [4]:

$$\mathcal{F} = 6n - \sum_{k=1}^5 k p_k = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1$$

где $\mathcal{F}$ – степень подвижности рабочего органа; n – количество подвижных звеньев механизма; p_k – количество кинематических пар k -го порядка.

Согласно формуле, робот-шар указанной конструкции обладает следующей подвижностью:

А) в свободном состоянии, $\mathcal{F} = 6$;

Б) при блокировании приводных призматических шарниров, $\mathcal{F} = 2$.

Так как конструкцией предусмотрено четыре привода, то из шести возможных степеней подвижности существует возможность управлять только четырьмя, а две оставшиеся подвижности являются избыточными. Наличие неконтролируемых степеней свободы приводит к невозможности точного осуществления заданной траектории из-за непредсказуемого смещения рабочего органа во время движения робота.

Для позиционирования рабочего органа в трёхмерном пространстве достаточно трёх поступательных степеней подвижности и двигателей соответственно. Управление тремя подвижностями с помощью четырёх двигателей позволит достичь более высокой точности позиционирования, максимальных скоростей и ускорений. Наличие дополнительного четвёртого вращательного движения не даёт каких-либо значительных преимуществ. Поэтому, стоит задача избавления не от двух, а от трёх степеней свободы суммарно во всех шарнирах.

Способы ограничения подвижности рабочего тела робота-шара с четырьмя опорами

При решении данной задачи необходимо учесть аспекты осмысленности и практичности предполагаемых замен типов шарниров

манипулятора. Для этого достаточно отсеять варианты, не удовлетворяющие следующим условиям:

- 1) приводные призматические шарниры не должны быть исключены;
- 2) из соображений практичности, а также для сохранения возможности перемещения рабочего органа по всему внутреннему объему сферического корпуса, не должны быть исключены или заменены на другие типы простые по конструкции сферические шарниры.

Следовательно, исключение трёх степеней свободы возможно двумя способами:

- 1) блокировка универсального шарнира в одной опоре и замена универсального шарнира на вращательный в другой (конфигурация 1-SP-1-SPR-2-SPU);
- 2) замена в трёх опорах универсальных шарниров на вращательные (конфигурация 3-SPR-1-SPU).

В табл. 1 и 2 произведены результаты анализа предельных случаев возможных соотношений между осями вращательных и призматических шарниров опор для первого и второго способов соответственно. Промежуточные случаи в данной работе не рассматриваются. Соотношения описываются в обозначениях рис. 1 и задаются для исходного состояния механизма, когда длины всех опор равны. В табл. 1 подразумевается, что универсальный шарнир d заблокирован; универсальный шарнир a заменен вращательным. В табл. 2 подразумевается, что универсальные шарниры a, b и c заменены вращательными.

Таблица 1. Предельные случаи возможных соотношений между осями вращательного и призматических шарниров опор при реализации первого способа исключения избыточных степеней свободы

№	Описание соотношений между осями	Типы степеней подвижности рабочего органа
1.1	Ось шарнира a перпендикулярна оси призматического шарнира Dd	3 поступательные
1.2	Ось шарнира a компланарна оси призматического шарнира Dd	2 поступательные, 1 вращательная

Таким образом, варианты 1.2 и 2.2 исключаются. Наиболее интересным с практической точки зрения представляется вариант 2.1, который, в отличие от других, обладает симметрией относительно оси, а не плоскости. Наличие более сильной симметрии означает, что движение рабочего органа при отработке траектории является более простым, как и соответствующая система управления. Далее предполагается использование именно этого варианта исключения избыточности подвижности рабочего органа.

Таблица 2. Предельные случаи возможных соотношений между осями вращательного и призматических шарниров опор при реализации второго способа сокращения исключения избыточных степеней свободы

№	Описание изменений шарниров и соотношений между осями	Типы степеней подвижности рабочего органа
2.1	Каждая из осей шарниров a, b и c перпендикулярна оси призматического шарнира Dd	3 поступательные
2.2	Каждая из осей шарниров a, b и c компланарна оси призматического шарнира Dd	2 поступательные, 1 вращательная
2.3	Ось шарнира a перпендикулярна оси призматического шарнира Dd. Каждая из осей шарниров b и c компланарна оси призматического шарнира Dd	3 поступательные
2.4	Каждая из осей шарниров a и b перпендикулярна оси призматического шарнира Dd. Ось шарнира c компланарна оси призматического шарнира Dd	3 поступательные

Конструкция робота-шара с четырьмя опорами и тремя поступательными степенями подвижности, обладающая свойством центральной симметричности

Центральная симметрия – идентичность конструкций опор – это свойство, позволяющее увеличить возможности робота по передвижению благодаря исключению зависимости команд управления от положения выделенной опоры. Оно заключается в предоставлении системе управления способности изменения набора опор, в которых универсальный шарнир редуцирован во вращательный. Для реализации этой способности необходимо снабдить каждый универсальный шарнир механизмом, обладающим четырьмя состояниями:

- 1) свободное состояние никак не ограничивает подвижность универсального шарнира ($f = 2$);
- 2) три одноосных состояния фактически редуцируют универсальный шарнир к вращательному ($f = 1$) так, чтобы его ось была перпендикулярна той из трёх других опор, которая является выделенной.

Подобный ограничивающий механизм может быть реализован как комбинация трёх винтовых тисков, повернутых друг относительно друга на 60° и движущихся в параллельных плоскостях. Свободному состоянию ограничивающего механизма соответствует максимальный раскрыт всех трёх

зажимов, а одноосным – сужение раскрыва соответствующих зажимов (см. рис. 2).

Такая конструкция должна обладать достаточной жесткостью, а также потреблять малое количество энергии, так как она расходуется только при сжатии/разжатии тисков.

Стоит отметить, что предложенный механизм обладает еще и пятым состоянием – состоянием полной блокировки универсального шарнира ($f = 0$). Оно может быть применено при исключении избыточных степеней подвижности способом 1.1.

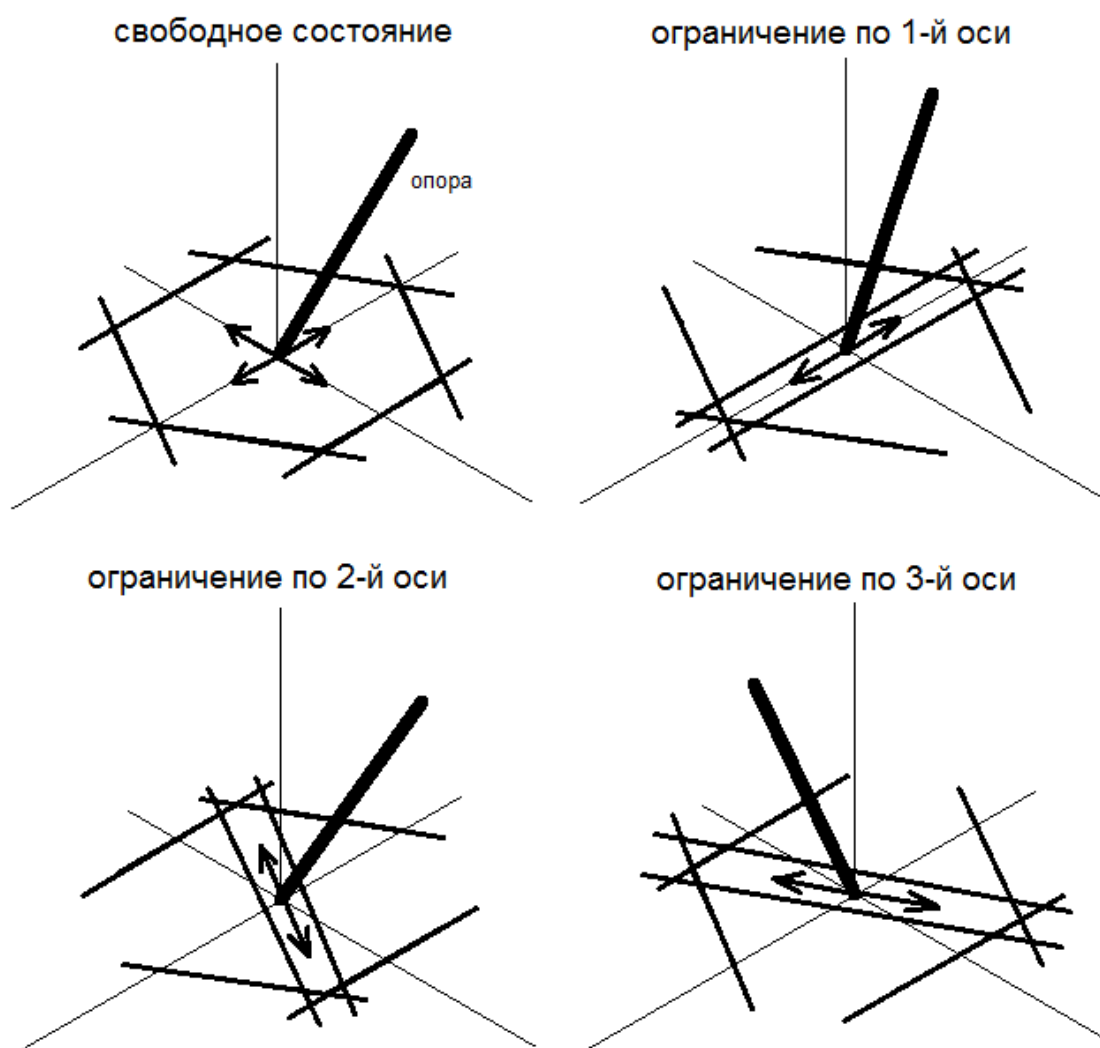


Рис. 2. Состояния ограничивающего механизма и возможные при этом направления движения опоры

Заключение

Шарообразные роботы на основе параллельного манипулятора являются перспективным видом мобильных роботов [1]. Рассмотренная

конструкция робота-шара обладает рядом достоинств, однако, ей присущ специфический недостаток – избыточная степень подвижности рабочего органа, которое приводит к неустраняемым колебаниям и существенному снижению качества управляемого движения.

В данной статье произведён расчёт степени подвижности рабочего органа робота-шара и поставлена задача исключения избыточных степеней свободы в шарнирах опор. На основе соображений целесообразности и практичности изменения типов шарниров предложены способы сокращения подвижности рабочего органа. Предложена конструкция робота-шара с четырьмя идентичными опорами, рабочий орган в которой обладает тремя поступательными степенями подвижности.

Дальнейшие исследования по теме заключаются в создании точной механической модели робота, определении углов поворота, нагрузок на конструкцию, возникающих во время движения, с целью подтверждения возможности практической реализации предложенной конструкции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке БРФФИ в рамках научного проекта № Ф16Р-146.

Список литературы

1. Прокопович Г.А. Мобильный робот с нулевым радиусом поворота // Робототехника и техническая кибернетика. – №2. – 2015. – С. 39-44.
2. Прокопович Г.А. Робот-шар // Патент РФ №2600043, 22.09.2016
3. Прокопович Г.А. Рекуперация энергии в мобильных робототехнических устройствах // Наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития: Материалы научно-технической конференции. – Минск, 2014. – С. 39-40.
4. Дворников Л.Т., Степанов А.В. К вопросу о классификации механизмов // Известия Томского политехнического университета. – №2. – Т. 314. – 2009. – С. 31-34

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ О ПОЛОЖЕНИИ ХАРАКТЕРНОЙ ТОЧКИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА KUKA KR6

Аннотация: В статье рассматривается метод численного решения обратной задачи кинематики о положении характерной точки фланца для промышленного робота KR6 и применение метода для получения прямолинейной траектории.

Ключевые слова: робототехника, промышленный робот, обратная задача кинематики, моделирование, численные методы решения

INVERSE KINEMATIC SOLUTION FOR POSITION OF POINT FOR INDUSTRIAL ROBOT KUKA KR6

A.I. Ryzhichenko, student, antrizhi@gmail.ru
Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract: Article contains numerical method of solution inverse kinematic problem for position of place for industrial robot KUKA KR6 and using this method to get straightforward trajectory.

Key words: robotics, industrial robot, inverse kinematic problem, modelling, numerical methods of solutions

Обратная задача кинематики является одной из основных задач в робототехнике при кинематическом анализе. Управление роботом осуществляется через обобщенные координаты – робот управляется приводами в шарнирах, а координаты объектов манипулирования задаются в прямоугольных координатах, поэтому и возникает потребность в решении обратной задачи кинематики. В качестве метода для решения обратной задачи кинематики был выбран численный метод Ньютона, так как получение решения в аналитическом виде возможно не для всех кинематических схем роботов [1].

В качестве примера был выбран промышленный робот фирмы KUKA KR6 (рис. 1), имеющий 6 степеней свободы. Так как для задания положения точки в пространстве необходимо три координаты, в качестве рабочих

шарнирных координат были выбраны первые три транспортные шарнирные координаты робота, остальные приняты равными нулю.



Рис. 1. Промышленный робот KUKA KR6

Для математического описания геометрической модели робота используется метод двух систем координат, связываемых с одним звеном. Матрица преобразования координат из S_6^* - системы координат связанной с фланцем на шестом звене в S_0 – систему координат связанную с основанием робота рассчитывается по формуле (1).

$$A_{0,6^*} = \prod_{i=1}^6 A_{(i-1)^*,i} A_{i,i^*} \quad (1)$$

где $A_{(i-1)^*,i}$ – матрица поворота вокруг оси Z, а A_{i,i^*} – матрица произвольного поворота системы координат и ее параллельный перенос [2].

В качестве характерной выбрана точка на конце фланца, в этой же точке располагается система координат S_6^* , поэтому -вектор описывающий ее положение будет нулевой. В результате получаем систему из трех уравнений (2).

$$\begin{cases} r_x = \vec{i} A_{0,6^*}(q_1, q_2, q_3) \vec{0}^T, \\ r_y = \vec{j} A_{0,6^*}(q_1, q_2, q_3) \vec{0}^T, \\ r_z = \vec{k} A_{0,6^*}(q_1, q_2, q_3) \vec{0}^T. \end{cases} \quad (2)$$

Для решения этой системы уравнения воспользуемся методом Ньютона. Составим вектор уравнений F (3), матрицу Якоби J (4), вектор обобщенных координат Q (5) и вектор поправок ΔQ для вектора обобщенных координат.

$$F = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_x}{\partial q_1} & \frac{\partial r_x}{\partial q_2} & \frac{\partial r_x}{\partial q_3} \\ \frac{\partial r_y}{\partial q_1} & \frac{\partial r_y}{\partial q_2} & \frac{\partial r_y}{\partial q_3} \\ \frac{\partial r_z}{\partial q_1} & \frac{\partial r_z}{\partial q_2} & \frac{\partial r_z}{\partial q_3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T \quad (5)$$

Вектор поправок для k-ой итерации рассчитывается решением системы линейных уравнений, записанных в матричном виде (6), а вектор обобщенных координат для k+1 итерации по формуле (7).

$$J^k \Delta Q^k = F^k \quad (6)$$

$$Q^{k+1} = Q^k - \Delta Q^k \quad (7)$$

Для данного робота исходным состоянием является Г-образное положение (рис. 3, а), он было выбрано как исходное и в геометрической модели, когда все обобщенные координаты равны нулю. В качестве примера для построения прямолинейной траектории был выбран исходный вектор характерной точки $[0.525 \ 0 \ 0.89]^T$ и конечный $[-0.3 \ 0.5 \ 1.1]^T$ (рис. 2, б). Траектория была разбита на 1000 точек и для каждой была решена обратная задача кинематики. В результате были получены значения обобщенных координат для каждой точки траектории (рис. 2, а).

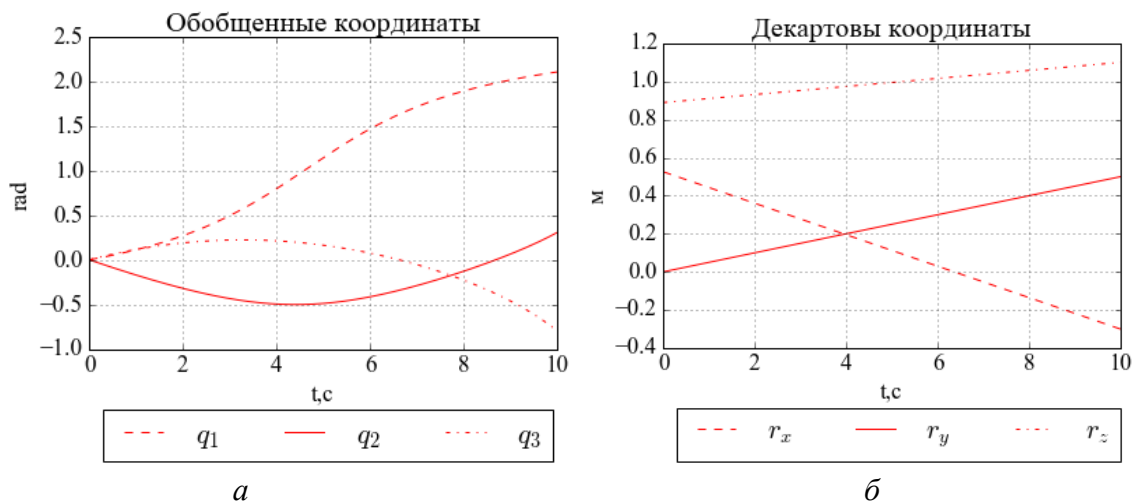


Рис. 2. Обобщенные и декартовы координаты

Однако, на реальном роботе может быть реализована не любая прямолинейная траектория. Это связано прежде все с тем, что диапазон

изменения обобщенных координат ограничен и при попытке выхода за его пределы происходит останов робота. Вторая причина заключается в том, что для отработки следующей точки необходимо резко изменить положение манипулятора, то есть для текущей точки возможно более одного варианта положений звеньев, а для следующей только одно, но на данный момент манипулятор не находится в этом положении.

Результат моделирования полученных значений шарнирных координат манипулятора и соответственно траектория представлены на рисунке (рис. 3, б).

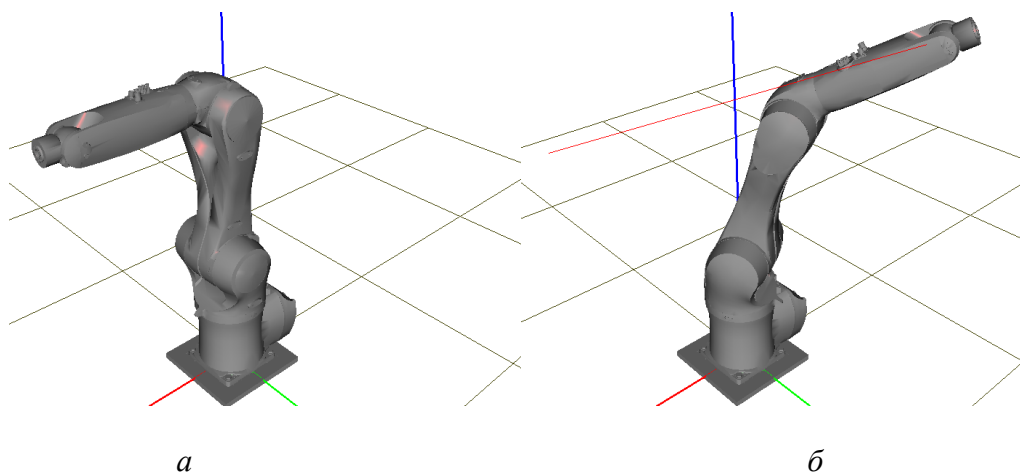


Рис.3. Результат моделирования

Решая подобные задачи численными методами можно получать готовый результат довольно быстро и для любого манипулятора, однако для реализации численных методов и их выполнения требуются большие вычислительные мощности, чтобы решение возможно было получать в режиме реального времени, во время работы робота. Программный код, написанный на языке программирования Python, выполняет расчет траектории для 1000 точек за 0.1 секунд на процессоре с тактовой частотой 2.62 ГГц (режим высокой производительности) и 0.46 секунд с тактовой частотой 0.48 – 0.68 (режим экономии энергии), чего для отработки не быстрых движений вполне достаточно.

Список литературы

1. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. – М.: Наука, 2006. – 383 с.
2. Крахмалев О.Н. Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов [Текст]+[Электронный ресурс]: монография. – Брянск: БГТУ, 2012. – 210с.

Филаретов В. Ф., д.т.н., профессор, filaret@dvo.ru

Зуев А. В., к.т.н., м.н.с., zuev@dvo.ru

Проценко А. А., аспирант, pro293133@gmail.com

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г.Владивосток, Россия
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

МЕТОД СИНТЕЗА НАБЛЮДАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИН ВОЗНИКАЮЩИХ ДЕФЕКТОВ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Аннотация: предлагается новый метод синтеза наблюдателей для определения величин возникающих дефектов в робототехнических системах. Этот метод основан на использовании диагностических наблюдателей и логико-динамического подхода, позволяющего применять линейные методы при диагностировании дефектов в нелинейных системах, а также на введении в полученные наблюдатели специальной обратной связи по сигналу невязки, которая обеспечивает точное определение величин появляющихся дефектов в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: аккомодация к дефектам, дефекты, робототехника, диагностирование, нелинейные системы

METHOD OF SYNTHESIS OF OBSERVERS FOR DETERMINATION OF SIZES OF ARISING FAULTS IN ROBOTIC SYSTEMS

V. Filaretov, Doctor of Science, Professor, filaretov@dvo.ru

A. Zuev, Ph.D., zuev@dvo.ru

A. Protchenko, pro293133@gmail.com

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract: a new method of synthesis of observers for determination of sizes of the arising faults in robotic systems is offered. This method is based on use of diagnostic observers and the logic-dynamic approach allowing to apply linear methods at the diagnosing faults in nonlinear systems and also on introduction of special feedback by residual signal which provides exact determination of sizes of arising faults in real time.

Key words: accommodation to faults, faults, robotics, diagnostic, nonlinear systems

Введение

Одним из перспективных путей повышения работоспособности различных автономных робототехнических систем (РС) при возникновении незначительных дефектов в их сенсорных и исполнительных элементах является использование систем аккомодации к этим дефектам [1]. Эти системы позволяют автоматически сохранять важнейшие характеристики РС, обеспечивая гарантированное выполнение заданных операций и миссий.

В настоящее время существует несколько различных подходов к синтезу систем аккомодации к дефектам в РС [1, 2]. Все эти подходы основаны на процедурах локализации и идентификации в реальном масштабе времени величин возникающих дефектов с помощью диагностических наблюдателей (ДН), а также на формировании специальных дополнительных сигналов коррекции законов управления, гарантирующих оперативное парирование этих дефектов. Для решения задачи точной идентификации величин указанных дефектов в ДН используется обратная связь, пропорциональная сигналу формирующейся невязки. Однако введение этой обратной связи позволяет определить величины дефектов только в том случае, когда ДН описываются дифференциальными уравнениями первого порядка [3]. Но в большинстве случаев наблюдатели описываются нелинейными уравнениями более высокого порядка, когда известный метод не может быть использован. Поэтому проблема разработки легко реализуемых систем точной идентификации дефектов, возникающих в различных элементах РС, по-прежнему остается важной и актуальной.

С учетом отмеченного в докладе ставится и решается задача разработки метода синтеза систем точной идентификации появляющихся дефектов в различных сложных РС, в которых используются ДН, описываемые дифференциальными уравнениями с размерностью превыше первой.

Процедура синтеза ДН

В общем случае РС может быть описана системой нелинейных дифференциальных уравнений, которая в матричной форме имеет вид:

$$\dot{x}(t) = F x(t) + B(x(t), u(t)) + G u(t) + L d(t),$$

$$y(t) = H x(t),$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния РС; $y(t) \in R^m$ – измеряемые датчиками переменные состояния РС ($m \leq n$); $u(t) \in R^l$ – вектор входа (управления); $d(t) \in R^p$ – вектор дефектов (при отсутствии дефектов все элементы вектора

$d(t)$ равны нулю, а при появлении дефекта конкретный элемент становится ненулевым); $F \in R^{n \times n}$ – матрица динамических свойств РС; $G \in R^{n \times l}$ – матрица коэффициентов усиления при управляющих воздействиях; $H \in R^{m \times n}$ – матрица выхода, связывающая вектор состояния РС с вектором измерений; $L \in R^{n \times p}$ – матрица дефектов, указывающая в каком месте РС возник дефект; $B \in R^n$ – вектор, определяющий нелинейную часть системы; n – количество переменных состояния (порядок системы); l – количество каналов управления; p – количество дефектов, которые могут возникнуть в системе; m – количество датчиков, измеряющих переменные состояния системы.

Задачу обнаружения дефектов и определения их величин предлагается решать на основе логико-динамического подхода [4]. В результате удастся сформировать банк ДН, каждый из которых чувствителен только к одному из дефектов и инвариантен к остальным. Каждый такой ДН с введенной обратной связью по сигналу невязки описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x}^*(t) &= F^* x^*(t) + B^*(x^*(t), y(t), u(t)) + G^* u(t) + J y(t) + w(r), \\ y^*(t) &= H^* x^*(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где $x^*(t) \in R^k$ – вектор состояния ДН ($k \leq n$); $y^*(t)$ – выходной сигнал ДН; $F^* \in R^{k \times k}$ – матрица динамических свойств ДН; $G^* \in R^{l \times k}$ – матрица, учитывающая вектор управления $u(t)$ в ДН; $H^* \in R^k$ – вектор, связывающий $x^*(t)$ с $y^*(t)$; $B^* \in R^k$ – вектор, учитывающий нелинейную часть системы в ДН; $J \in R^{m \times k}$ – матрица, учитывающая $y(t)$ в ДН; k – количество переменных состояния ДН (порядок ДН); $w(r) \in R^k$ – вектор, задающий обратную связь по сигналу невязки.

При синтезе ДН (1) матрица F^* и вектор H^* обычно задаются в следующем виде [4]: $F^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$, $H^* = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$, а матрицы

G^* , J , B^* , а также размерность ДН определяются по известным процедурам.

ДН (1) строится таким образом, чтобы при отсутствии дефектов выполнялись следующие соотношения: $\dot{x}^*(t) = \Phi x(t)$, $G^* = \Phi G$, $C H = H^* \Phi$, $\Phi F = F^* \Phi + J H$. Матрица $\Phi \in R^{n \times k}$ и вектор $C \in R^m$ определяются в ходе синтеза ДН.

Невязка $r(t)$, указывающая на отсутствие или появление дефекта в РС, формируется в виде $r(t) = C y(t) - y^*(t) = H^* e(t) - w(r)$, где $e(t) = \Phi x(t) - x^*(t) \in R^k$ – вектор рассогласования фазовых координат РС и

ДН.

Для дальнейшего решения задачи идентификации дефектов необходимо определить связь между невязкой $r(t)$ и дефектом $d_i(t)$, которому чувствителен построенный наблюдатель ($i = \overline{1, p}$). Эта связь, с учетом вида вектора H^* , задается следующим выражением:

$$\dot{e}(t) = F^* e(t) + \Phi B(x(t), u(t)) - B^*(x^*(t), u(t)) + \Phi L d(t) - w(r). \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что в частном случае, когда размерность ДН равна 1 (т.е. $y(t)=x(t)$) всегда будут выполняться следующие условия: $F^*=0$, $\Phi B=B^*$ и $e(t)=r(t)$. В результате введение простой обратной связи, пропорциональной сигналу невязки $r(t)$ позволит точно определить величину возникающего дефекта [3]. Однако для случая, когда размерность ДН выше первой (т.е. $y(t) \neq x(t)$) составляющие $F^* e(t)$, $\Phi B(x(t), u(t))$ и $\Phi L d(t)$ в уравнении (2) будут неизвестными. В этом случае идентификация дефектов с помощью введения описанной простой обратной связи становится невозможной.

Для решения указанной проблемы в докладе предлагается вводить в ДН такую обратную связь по сигналу невязки, которая всегда обеспечит $e(t) = 0$. В этом случае будут выполняться соотношения: $F^* e(t) = 0$, $\Phi B = B^*$ и $\dot{e}(t) = 0$. В результате величина обратной связи станет пропорциональна составляющей $\Phi L d(t)$, что позволит в дальнейшем точно определить искомый дефект. Далее рассмотрим процедуру синтеза указанной обратной связи.

Синтез обратной связи по сигналу невязки

Поскольку ДН при логико-динамическом подходе строились таким образом, чтобы каждый наблюдатель был чувствителен только к одному из дефектов и обеспечивалась инвариантность к остальным, то с учетом вида матрицы F^* и свойств матрицы ΦL выражение (2) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} f_v d_i + a_v = \dot{e}_v + w_v = \ddot{e}_{v-1} + \dot{w}_{v-1} + w_v = \ddot{e}_{v-2} + \dot{w}_{v-2} + \\ + \dot{w}_{v-1} + w_v = e_1^{(v)} + w_1^{(v-1)} + \dots + w_{v-1}^{(1)} + w_v, \end{aligned} \quad (3)$$

где a_v - v -ый элемент вектора $\Phi B(x(t), u(t)) - B^*(x^*(t), u(t))$, $v = \overline{1, k}$, f_v - v -ый элемент вектора ΦL .

Пусть элементы вектора обратной связи, кроме v – го пропорциональны величине невязки $w_j = T_j e_1 / T_0$ ($j = \overline{1, v-1}$), где T_0 , T_j – коэффициенты обратной связи, а $w_v = T_v e_1 / T_0 + z(e_1) / T_0$. В этом случае уравнение (3) можно переписать:

$$f_v d_i + a_v = e_1^{(v)} + T_1 e_1^{(v-1)} / T_0 + \dots + T_{v-1} e_1^{(1)} / T_0 + T_v e_1 / T_0 + z(e_1) / T_0. \quad (4)$$

Если представить значение $f_v d_i + a_v$ в виде входного сигнала, а e_1 в виде выходного, то выражение (4) можно переписать в виде следующей передаточной функции: $W = \frac{T_0}{T_0 s^v + \dots + T_{v-1} s + T_v + Z(s)}$, где s – оператор Лапласа.

Предположим, что $f_v d_i + a_v$ может быть представлен в виде полинома степени q : $f_v d_i + a_v = b_0 + b_1 t + \dots + b_q t^q$, где $b_0, \dots, b_q$ – некоторые постоянные коэффициенты. Тогда установившееся значение e_1 может быть найдено следующим образом:

$$e_1 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{T_0(b_0 s^{q-1} + \dots + b_q)s}{(T_0 s^v + \dots + T_v)s^{q+1} + z(s)s^{q+1}}.$$

Полагая, что $Z(s) = \frac{T_{v+1}}{s} + \frac{T_{v+2}}{s^2} + \dots + \frac{T_{v+q}}{s^q} + \frac{T_{v+q+1}}{s^{q+1}}$ можем получить:

$$e_1 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{T_0(b_0 s^{q-1} + \dots + b_q)s}{(T_0 s^v + \dots + T_v)s^{q+1} + T_{v+1}s^q + \dots + T_{v+q+1}} = 0.$$

Таким образом введение предложенной обратной связи приводит к обнулению установившегося значения e_1 .

Во многих реальных РС возникают постоянные или медленно изменяющиеся дефекты. В этом случае (с учетом того, что мы можем выбрать $T_{v+1}=1$) $z(e_1) = \int e_1 dt$. Тогда величина искомого дефекта d_i будет

$$\text{определяться выражением: } d_i = \frac{1}{f_v T_0} \int e_1 dt.$$

Таким образом, введенная обратная связь позволяет получить точную оценку величины возникающих в РС дефектов.

Результаты моделирования

Для проверки работоспособности и эффективности предлагаемого метода идентификации дефектов было проведено моделирование работы синтезированной системы на примере идентификации дефектов в электроприводах промышленного робота.

При моделировании дефект в электроприводе имитировался скачкообразным изменением величины момента сухого трения на величину 0.01 Нм в период с $t_1=10$ с до $t_2=20$ с.

На рис. 1 представлен результат работы предложенной системы идентификации дефектов. Из этого рисунка можно видеть, что система идентификации позволяет своевременно определять факт появления дефекта, а также точно оценить его величину. Аналогичные результаты были получены и для других типов возникающих дефектов.

Таким образом, результаты моделирования на примере идентификации дефектов, возникающих в электроприводах многозвенного манипулятора, показали полную работоспособность и высокую эффективность предложенного в работе метода.

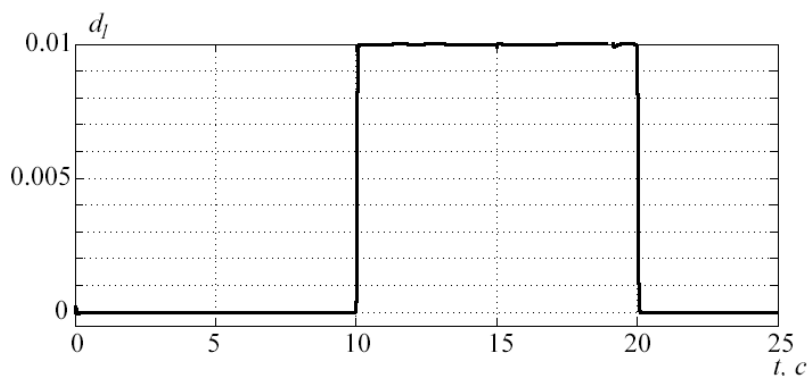


Рис. 1. Результат идентификации величины дефекта

Заключение

В докладе разработан метода синтеза систем точной идентификации появляющихся дефектов в различных сложных РС, в которых используются ДН, описываемые дифференциальными уравнениями с размерностью превыше первой. Этот метод основан на использовании логико-динамического подхода к синтезу ДН для нелинейных систем, а также на введении в эти ДН комплексной обратной связи по сигналу невязки специального вида, что обеспечивает точное определение величин появляющихся дефектов в реальном масштабе времени.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-04195.

Список литературы

1. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. Diagnosis and Fault Tolerant Control. – Springer-Verlag: Berlin, 2003. – 571 p.
2. Isermann R. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. – Springer-Verlag: Berlin, 2006. – 475 p.
3. Филаретов В.Ф., Жирабок А.Н., Зуева А.В., Проценко А.А. Разработка метода синтеза системы аккомодации к дефектам в электроприводах манипуляционных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т.11. – №4. – С. 26-33.
4. Жирабок А.Н., Усольцев С.А. Линейные методы при диагностировании нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. – №7. – 2000. – С 149-159.

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА СКОРОСТНЫХ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РОБОТАМИ

Аннотация: Рассматриваются особенности синтеза высоконадежных скоростных систем управления для промышленных роботов, обеспечивающих гарантированное выполнение сложных технологических операций с предельно допустимой скоростью даже при возникновении дефектов в электроприводах этих роботов. Результаты математического моделирования подтвердили работоспособность и эффективность синтезированных систем управления.

Ключевые слова: промышленный робот, высокая скорость, диагностика, аккомодация к дефектам

FEATURES OF SYNTHESIS OF HIGH- SPEED AND RELIABLE CONTROL SYSTEMS FOR INDUSTRIAL ROBOTS

A.S. Gubankov, Ph.D., gubankov@dvo.ru

A.V. Zuev, Ph.D., zuev@dvo.ru

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract: Synthesis features of high-speed and reliable control systems for industrial robots are considered in this paper. These control systems provide the guaranteed carrying out the technological operations with a maximum speed. At this it is supposed, that the faults can occur in actuators. Results of mathematical modeling confirmed working capacity and efficiency of the synthesized control systems.

Key words: industrial robot, high speed, diagnostics, accommodation to faults

Введение

Для повышения производительности промышленного робототехнического оборудования необходимо, чтобы все технологические

операции выполнялись на предельно высоких скоростях, но при этом качество оставалось на должном уровне [1, 2]. Существующие системы управления (СУ) позволяют обеспечить промышленным роботам (ПР) высокую динамическую точность при быстром перемещении по предписанным траекториям только при условии, что все их приводы обладают достаточным ресурсом мощности, т.е. способны отработать сигнал любого программного движения ПР и одновременно компенсировать возникающие негативные эффекты динамического взаимовлияния между всеми его степенями подвижности без входа в режим насыщения. Если же хотя бы один из приводов ПР входит в режим насыщения, то схват ПР неминуемо сходит с заданной траектории, приводя к браку или даже возникновению аварийных ситуаций. Для устранения таких ситуаций при использовании традиционных СУ приходится снижать программную скорость движения схвата ПР по заданным траекториям, уменьшая производительность их работы даже в тех случаях, когда все их приводы на многих участках заданных траекторий еще имеют значительный запас мощности для управления.

При выполнении различных технологических операций ПР в нагруженных режимах с предельной скоростью важное значение имеет повышение надежности этих сложных технических систем [3]. Она достигается за счет оперативного диагностирования состояния основных элементов ПР, а также формирования специальных управляющих воздействий, которые позволяют автоматически сохранять (стабилизировать) важнейшие характеристики ПР при появлении незначительных дефектов. Решение указанной задачи принято называть аккомодацией к дефектам. Существующие в настоящее время системы аккомодации ориентированы на работу с объектами диагностирования, описываемыми линейными дифференциальными уравнениями. Это не позволяет решать задачу аккомодации к возможным дефектам в электроприводах ПР, описываемых, как правило, нелинейными дифференциальными уравнениями с существенно переменными параметрами.

В докладе ставится и решается задача разработки нового метода синтеза скоростных СУ ПР с аккомодацией к возникающим в их электроприводах дефектам, который обеспечивает гарантированное выполнение заданных технологических операций с предельно возможной скоростью.

Синтез системы формирования предельно возможной скорости движения схвата ПР

Для решения поставленной задачи предлагается использовать следующий метод синтеза адаптивных системы формирования скорости движения ПР [2].

Вначале для придания каждому электроприводу перемещающегося ПР свойства инвариантности показателей качества работы к эффектам взаимовлияния между всеми его степенями подвижности (для стабилизации их параметров, а следовательно, и коэффициентов уравнений, которыми они описываются, на номинальном уровне) в СУ каждым электроприводом вводятся самонастраивающиеся корректирующие устройства, синтез которых подробно описан в работе [1].

Затем для обеспечения требуемых показателей качества работы соответствующих электроприводов с уже застabilизированными параметрами в их прямые цепи вводятся типовые последовательные корректирующие устройства, параметры которых рассчитываются традиционными методами.

Далее решается обратная задача кинематики для нахождения законов изменения всех обобщенных координат q_i ПР ($i = \overline{1, n}$, где n – число степеней подвижности многозвенника), которые будут являться входными сигналами для соответствующих следящих электроприводов ПР.

После этого задается аналитическое описание желаемой траектории движения схвата ПР в пространстве $y = f(x)$, $z = f(x)$ и определяются законы изменения координат $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ во времени по методу, описанному в работе [4].

И, наконец, строится алгоритм формирования предельно возможной скорости движения схвата ПР, который заключается в следующем. Пока все электроприводы ПР работают в линейной зоне и выполняется неравенство $|\gamma_{ref}| > |\gamma|$, где γ – безразмерный сигнал, $\gamma_{ref} = \text{const}$ – опорное значение, скорость движения схвата по заданной траектории будет расти с постоянным ускорением δ_1 . Если же некоторые сигналы u_i на входах соответствующих усилителей или токи якорных цепей I_i электроприводов ПР начнут превышать установленные для них пороговые значения, за пределами которых проявляются зоны значительных нелинейностей электродвигателей или даже зоны их насыщения, то начинает выполняться условие $|\gamma_{ref}| < |\gamma|$, и разность $\gamma_{ref} - \gamma$ становится отрицательной. В этом случае скорость движения схвата ПР по траектории будет снижаться с постоянным ускорением δ_2 , повышая тем самым динамическую точность управления ПР. Значения δ_1 и δ_2 зависят от динамических свойств электроприводов ПР, а также от используемых СУ и подбираются посредством моделирования.

Исследования показали, что для работы всех электроприводов ПР в их линейных зонах при перемещении схвата по пространственным траекториям достаточно формировать γ в виде:

$$\gamma = K_1 \max(|u_1|, \dots, |u_i|, \dots, |u_n|) + K_2 \max(|I_1|, \dots, |I_i|, \dots, |I_n|), \quad (1)$$

где K_1 и K_2 – некоторые положительные весовые коэффициенты, значения которых определяются в процессе моделирования или экспериментально. В зависимости от величины кривизны отдельных участков траекторий,

требований к динамической точности движения схвата, а также от наличия и доступности соответствующих датчиков один из этих весовых коэффициентов в (1) можно принимать равным нулю, значительно упрощая практическую реализацию предлагаемых СУ.

Таким образом, описанный подход позволяет обеспечивать перемещение схвата ПР по произвольным гладким траекториям на предельно возможных скоростях с заданной динамической точностью. Однако это справедливо только при отсутствии дефектов в работе нагруженных электроприводов ПР. В случае появления даже незначительных дефектов требуемая динамическая точность не будет гарантирована. Следовательно, необходимо обеспечить непрерывное диагностирование электроприводов ПР, а также аккомодацию к появляющимся в них дефектам.

Синтез системы систем аккомодации к дефектам в электроприводах ПР

Рассмотрим предлагаемый метод синтеза систем аккомодации на примере ПР, приводимого в движение с помощью электроприводов, каждый из которых имеет регулятор, обеспечивающий заданные показатели качества. При этом будем учитывать следующие типовые дефекты: дефект в датчике, измеряющем положение выходного вала редуктора; дефект, обусловленный изменением величины момента сухого трения; дефект, вызванный изменением активного сопротивления цепи якоря электродвигателя (например, из-за нагрева при его длительной работе в различных режимах).

При функционировании ПР (особенно в скоростных режимах) каждый дефект независимо от причины его появления должен быть своевременно обнаружен, а его влияние на качественную работу ПР устранено. Очевидно, что при существенной переменности параметров электроприводов и наличии нелинейностей решить задачу аккомодации к дефектам традиционными методами, ориентированными на линейные модели объектов управления, невозможно.

Для устранения рассмотренной проблемы предлагается новый метод аккомодации, состоящий из трех основных этапов [5]: 1) синтез банка диагностических наблюдателей на основе логико-динамического подхода для обнаружения и локализации дефектов [6]; 2) идентификация значений величин дефектов при наличии возмущений и значительных начальных рассогласований состояний электроприводов ПР и соответствующих наблюдателей за счет введения в каждый наблюдатель специальной обратной связи по сигналу невязки [5]; 3) формирование СУ, гарантирующих оперативное парирование возникающих дефектов.

Решение последней задачи предложено осуществлять с помощью корректирующих устройств, стабилизирующих параметры электроприводов на номинальном уровне [1]. При этом за счет использования дополнительных

сигналов невязок в законе самонастройки [5] удастся обеспечить точную стабилизацию динамических свойств всех электроприводов ПР даже при наличии дефектов, успешно компенсируя их.

Исследование работы синтезированной системы

Для проверки работоспособности и эффективности предлагаемого метода было проведено моделирование работы синтезированной высокоскоростной надежной СУ для шестистепенного ПР типа PUMA.

В процессе моделирования была исследована работа системы с настройкой скорости движения схвата ПР по круговой траектории радиусом 0.15 м при двух наборах коэффициентов в выражении (1): $K_1 = 0$, $K_2 = 1$ и $K_1 = 2$, $K_2 = 1$, при этом соответственно $\gamma_{ref} = 20$ и $\gamma_{ref} = 40$. Дефекты в приводах имитировались скачкообразным изменением величины активного сопротивления на 50%, величины момента сухого трения на 50% и введением постоянной ошибки в датчики положения.

На рис. 1 показаны процессы изменения скорости $V_{(2)}^*$ движения схвата ПР и динамической ошибки $\varepsilon_{дин(2)}$ его движения при выполнении двух оборотов по круговой траектории в адаптивной системе при задании сигнала γ с первым набором коэффициентов, а также законы изменения $V_{(3)}^*$ и $\varepsilon_{дин(3)}$ при определении γ со вторым набором коэффициентов. На рис. 1 используется следующий масштаб: $V^* = \text{scale } 1 \text{ м/с}$; $\varepsilon_{дин} = \text{scale } 0,0025 \text{ м}$. Из рис. 1 видно, что адаптивная система, позволяет повысить производительность ПР по сравнению с системой, работающей на постоянной скорости, в 2,43 раза при сохранении заданной точности управления.

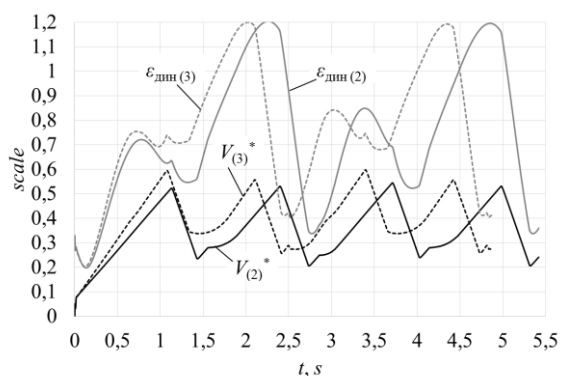


Рис. 1. Законы изменения $V_{(2)}^*$, $\varepsilon_{дин(2)}$ и $V_{(3)}^*$, $\varepsilon_{дин(3)}$ при движении схвата ПР по круговой траектории

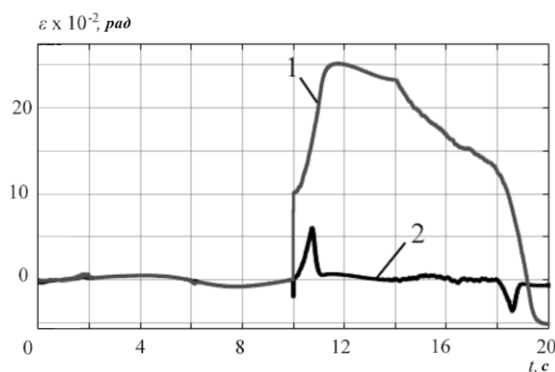


Рис. 2. Ошибки электропривода по положению при возникновении дефектов

На рис. 2 представлен закон изменения ошибки по положению электропривода одной степени подвижности ПР при появлении

рассмотренных дефектов без введения предложенной в данной работе системы аккомодации (см. кривую 1), а также ошибки при введении данной системы (см. кривую 2).

Из рис. 2 видно, что максимальные значения динамических ошибок по положению рассматриваемого электропривода ПР после возникновения в нем указанных типовых дефектов при наличии систем управления без аккомодации увеличивались до 20 раз, а при использовании системы управления с аккомодацией негативные воздействия этих дефектов на точность работы рассматриваемого электропривода полностью исключались.

Заключение

В докладе рассмотрены особенности синтеза высоконадежных скоростных систем управления ПР. Рассмотрен новый метод синтеза адаптивных систем, обеспечивающих перемещение схвата ПР по произвольным гладким траекториям на предельно возможных скоростях с заданной динамической точностью. При этом для сохранения работоспособности ПР предложен эффективный метод синтеза систем аккомодации к возникающим типовым дефектам в электроприводах робота.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00300.

Список литературы

1. Филаретов В.Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. – 304 с.
2. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Система формирования предельно высокой скорости движения рабочего органа многостепенного манипулятора по произвольной траектории // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 11. – № 4. – С. 19–25.
3. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. Diagnosis and Fault Tolerant Control. Berlin: Springer-Verlag, 2003. – 571 p.
4. Губанков А.С., Горностаев И.В. Разработка метода синтеза систем формирования скорости динамических объектов // Материалы VII Всерос. научн.-техн. конф. с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект» (РИИ-15), Россия, г.Железнодорожный, 2015. – С. 13-18.
5. Филаретов В.Ф., Жирабок А.Н., Зуева А.В., Проценко А.А. Разработка метода синтеза системы аккомодации к дефектам в электроприводах манипуляционных роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 11. – № 4. – С. 26–33.
6. Жирабок А.Н., Усольцев С.А. Линейные методы при диагностировании нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 7. – С. 149–159.

Секция 2

СПЕЦИАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

А. А. Богданов, главный конструктор, info@rusandroid.com
И. М. Кутлубаев, д.т.н., научный консультант, ptmr74@mail.ru
А. Ф. Пермяков, генеральный директор, info@rusandroid.com
В. Б. Сычков, научный консультант
АО «НПО «Андроидная техника», г. Москва, Россия

АНТРОПОМОРФНЫЕ РОБОТЫ – СОСТАВЛЯЮЩАЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ОРБИТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

Аннотация: В настоящее время ведётся активная разработка технологий, позволяющих повысить эффективность космических полетов, снизить расходы на их эксплуатацию, повысить безопасность работы космонавта. Антропоморфный тип робототехнических систем обладает огромным потенциалом при решении перспективных задач космической индустрии, обеспечивая выполнение точных движений захватами.

Представлены ключевые технологии НПО «Андроидная техника» в области робототехники направленные на создание комплекса способного выполнять технологические операции без непосредственного участия космонавта.

Представлены результаты экспериментальных исследований функционирования Российского космического антропоморфного робота – SAR-401, проведённые в Центре подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина в 2013 и 2015 гг. Рассматривается система визуализации, обеспечивающая «эффект присутствия» оператора в рабочей зоне робота. Анализируется вопрос применения программно-аппаратного комплекса автоматизированного рабочего места оператора для управления SAR-401 и эмуляции сценариев его функционирования с использованием 3D-модели антропоморфного робота и окружающей обстановки.

Ключевые слова: орбитальная станция, антропоморфный робот, задающее устройство копирующего типа, технологические операции

ANTHROPOMORPHIC ROBOTS

AS A COMPONENT OF ORBITAL STATION SCIENTIFIC EQUIPMENT

A. A. Bogdanov, info@rusandroid.com
I. M. Kutlubayev, Ph.D., ptmr74@mail.ru
A. F. Permyakov, info@rusandroid.com
V. B. Sychkov, info@rusandroid.com
JSC “SPA “Android technics”, Moscow, Russia

Abstract: At the present time the dynamic development of technologies that make it possible to raise effectiveness of spaceflights, decrease spaceflight costs, increase cosmonaut occupational safety is being conducted. Anthropomorphic type of robotic systems possesses huge potential in solving of perspective cosmic industry problems providing fine movements by captures.

SPA “Android technics” robotic advanced technology oriented to design a complex that is able to perform operations without cosmonaut direct participation is represented.

Pilot research results of performance of SAR-401 Russian cosmic anthropomorphic robot were achieved in “Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center” in 2013 and 2015. Today these results are represented. Visualization system which provides the “presence effect” of the operator in a robot working envelope is considered. The issue of usage of operator workstation hardware and software system for SAR-401 control and emulation of its functioning scenarios using 3d models of anthropomorphic robot and environment is analyzed.

Key words: orbital station, anthropomorphic robot, copying type setting device, technologic operations.

Успешная эксплуатация орбитальной станции (ОС) обеспечивается своевременным проведением космонавтами работ по ее обслуживанию. Операции, выполняемые вне ОС, являются наиболее сложными и ответственными. Их можно разделить на три категории: транспортные, транспортно-технологические, технологические.

Для обеспечения первых двух используются робототехнические системы: Canadarm-2 [1], Dextre (Special Purpose Dexterous Manipulator) [2], Japanese Experiment Module Remote Manipulator System (JEMRMS) [3].

Технологические операции осуществляются космонавтами и производятся в соответствии с полетными заданиями. По информации РКК «Энергия» основной объем работ, выполненных космонавтами и сопряженных с выходом из орбитальной станции, приходится на установку / снятие блочного оборудования (рис. 1) [4].

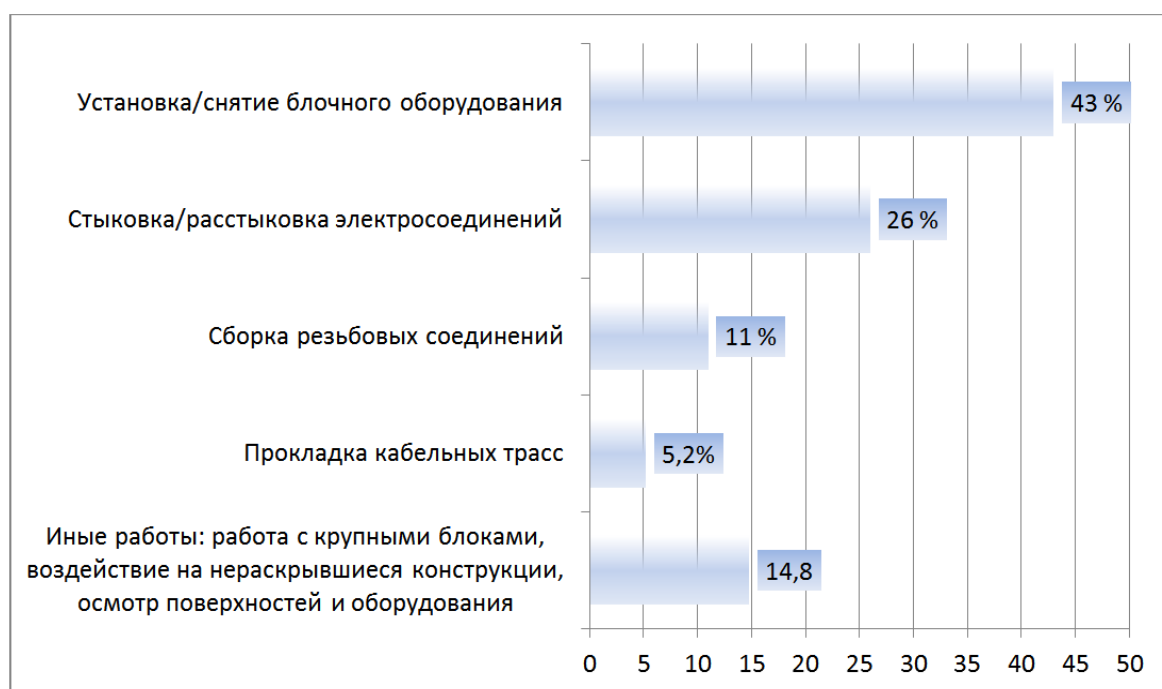


Рис. 1. Распределение по видам работ, выполненных космонавтами РФ (СССР) в 1974–2012 гг.

Расширение реализуемых космических программ предполагает увеличение как номенклатуры, так и объемов используемого оборудования и научной аппаратуры. Это приведет к росту числа ситуаций, требующих работы космонавтов вне ОС.

В связи с этим возникла настоятельная необходимость создания комплекса, способного осуществлять технологические операции вне ОС без непосредственного присутствия космонавта. Вся существующая инфраструктура, оборудование, инструментарий ориентированы на физические возможности человека. Это определяет наиболее рациональную структуру комплекса в виде антропоморфного робота (АР), имеющего кинематическую схему исполнительской части, построенной по подобию с человеком [5].

Применительно к работам, выполняемым на ОС, построение АР имеет существенные отличия от вариантов, используемых в условиях Земли. Исполнительский комплекс АР включает две составляющие. Первая, функциональная, предназначена для непосредственного выполнения технологических операций. Вторая составляющая – опорная, обеспечивает перемещение вдоль поверхности ОС и фиксацию АР в заданной точке рабочей зоны.

Кинематическая схема функциональной составляющей должна обеспечить зону обслуживания, совпадающую с зоной, присутствия космонавта, и, возможно, больший угол сервиса в точках позиционирования.

Фиксация пространственного положения АР обеспечивается в условиях компенсации силы тяжести. Опорная составляющая АР должна

иметь активный способ замыкания на элементах ОС. В связи с этим ее кинематическая схема близка к кинематической схеме функциональной составляющей.

Управление АР так же решается отдельно для каждой из его составляющих. Перемещение, с непрерывным взаимодействием с элементами ОС, позволяет решать задачу управления движением звеньев опорной составляющей на основе решения обратной задачи кинематики. При этом планирование движения звеньев, в силу определенного положения элементов ОС, легко решается программным способом [6].

Движение звеньев функциональной составляющей определяется технологической операцией, как правило, выполняемой в недетерминированных условиях. При отсутствии эффективных систем искусственного интеллекта, способных самостоятельно управлять многодвигательными механическими системами, наиболее рационально использовать прямое управление оператором.

Функциональная составляющая исполнительного комплекса включает в себя четыре типа модулей: корпусной, манипуляторы, захваты, блок контроля и управления (рис. 2).

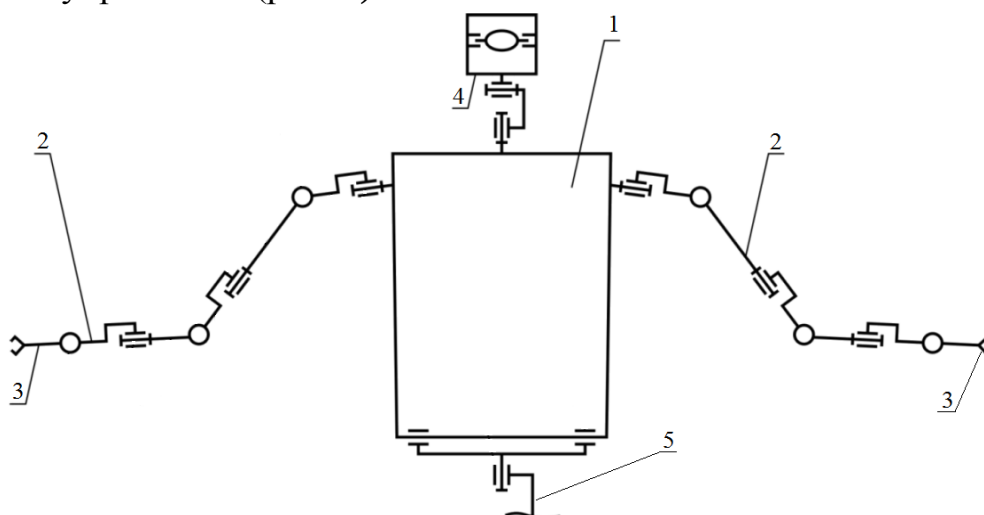


Рис. 2. Кинематическая схема антропоморфного робота: 1 – корпусной модуль, 2 – манипуляторы, 3 – захваты, 4 – блок контроля и управления, 5 – опорная составляющая

Антропоморфность конструкции определяет минимально необходимое число степеней подвижности: в корпусном модуле – три (относительно опорной составляющей), в каждом из двух манипуляторов – по семь, в захвате – не менее десяти, в блоке контроля и управления – две.

Одновременное управление всеми подвижностями возможно только при использовании специальной управляющей системы – задающего устройства копирующего типа (ЗУКТ) [7].

С учетом изложенного концепция построения функциональной составляющей АР [8], принятая к реализации в АО «НПО «Андроидная техника», основана на использовании трех компонентов: исполнительного

комплекса, задающего устройства копирующего типа, виртуальной модели исполнительного комплекса и окружающей обстановки (рис. 3).



Рис. 3. Структурная схема построения и управления антропоморфного робота

Основные принципиальные и конструкторские решения при создании АР были получены в ходе выполнения научно-исследовательских работ совместно с ЦНИИМаш и ЦПК им. Ю. А. Гагарина [9, 10]. Выполненные исследования в период 2013–2016 гг. с использованием антропоморфного робота SAR-401 подтвердили правильность выбранной концепции.

Антропоморфная структура SAR-401 позволяет выполнять все работы, соответствующие технологическим операциям. Были реализованы силовые действия (рис. 4).

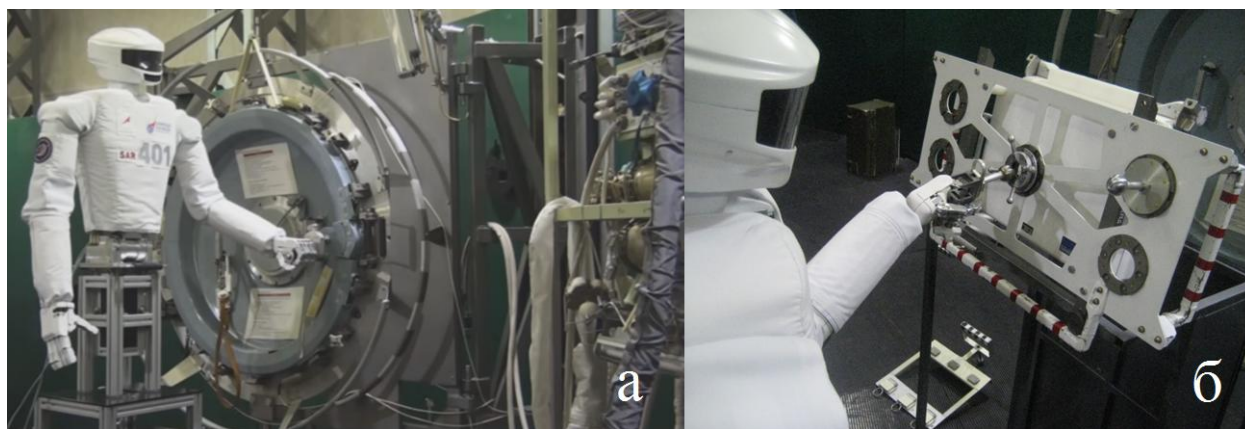


Рис. 4. Силовые действия: а) открытие переходного люка, б) работа с адаптером контейнера

Разработанная конструкция захвата обеспечила выполнение действий, соответствующих категории мелкой моторики: установку и снятие контейнера БИОРИСК, работу с карабином (рис. 5).

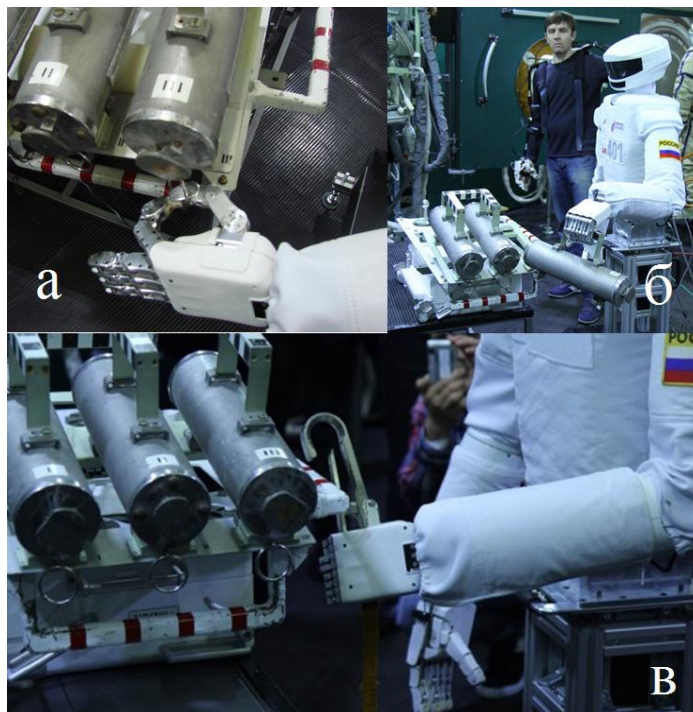


Рис. 5. Действия, выполняемые захватом робота SAR-401: а) снятие стопора, б) захват контейнера, в) расстегивание карабина

Управление всеми движениями исполнительного комплекса осуществляется одним оператором. Совпадение кинематических схем ЗУКТ и SAR-401 позволяет формировать задание приводам на основе естественной моторики человека (рис. 6).



Рис. 6. Общий вид исполнительного комплекса SAR-401 и ЗУКТ

Зрительная информация из рабочей зоны, регистрируемая посредством двух стереокамер, установленных в блоке контроля и управления, передается оператору на шлем виртуальной реальности. При этом оператору обеспечивается эффект присутствия (рис. 7).



Рис. 7. Параллельное управление SAR-401 и виртуальной моделью

Для оценки возможности длительного использования ЗУКТ в комплекте со шлемом виртуальной реальности были проведены специальные исследования в ЦПК им. Ю. А. Гагарина. В экспериментальных исследованиях участвовали 34 человека: 27 специалистов Центра подготовки космонавтов и 7 действующих космонавтов (отряд ЦПК). Контроль оценки состояния участников эксперимента проводился по стандартным методикам специалистами медицинского центра ЦПК. Непрерывное выполнение виртуальных технологических операций осуществлялось в течение 30–45 минут. Результаты оценки эргономичности и комфортности использования ЗУКТ представлены на рис. 8.

Общая оценка, полученная в результате исследования, положительна. ЗУКТ рекомендовано для управления АР.

В качестве одной из составляющих АР следует считать виртуальную интерактивную 3D модель, включающую симуляторы физической модели SAR-401 и окружающей обстановки.

Ее использование обеспечивает:

- предварительную проработку выполнения технологических операций;
- планирование и оценку интерьера ОС, размещение оборудования с точки зрения удобства его обслуживания и ремонта;
- подготовку операторов для управления АР.

Следует отметить – аналогичные разработки выполняются и в Европе, в частности, в Германии. В рамках возможности совместного осуществления

технологических операций АР, созданными в разных странах участников космического проекта, было выполнено дистанционное управление роботом AILA (г. Бремен, Германия) задающим устройством SAR-401 (г. Магнитогорск, Россия) и обратное действие (рис. 9). Проведенные исследования показали возможность согласованного и эффективного перекрестного управления АР.

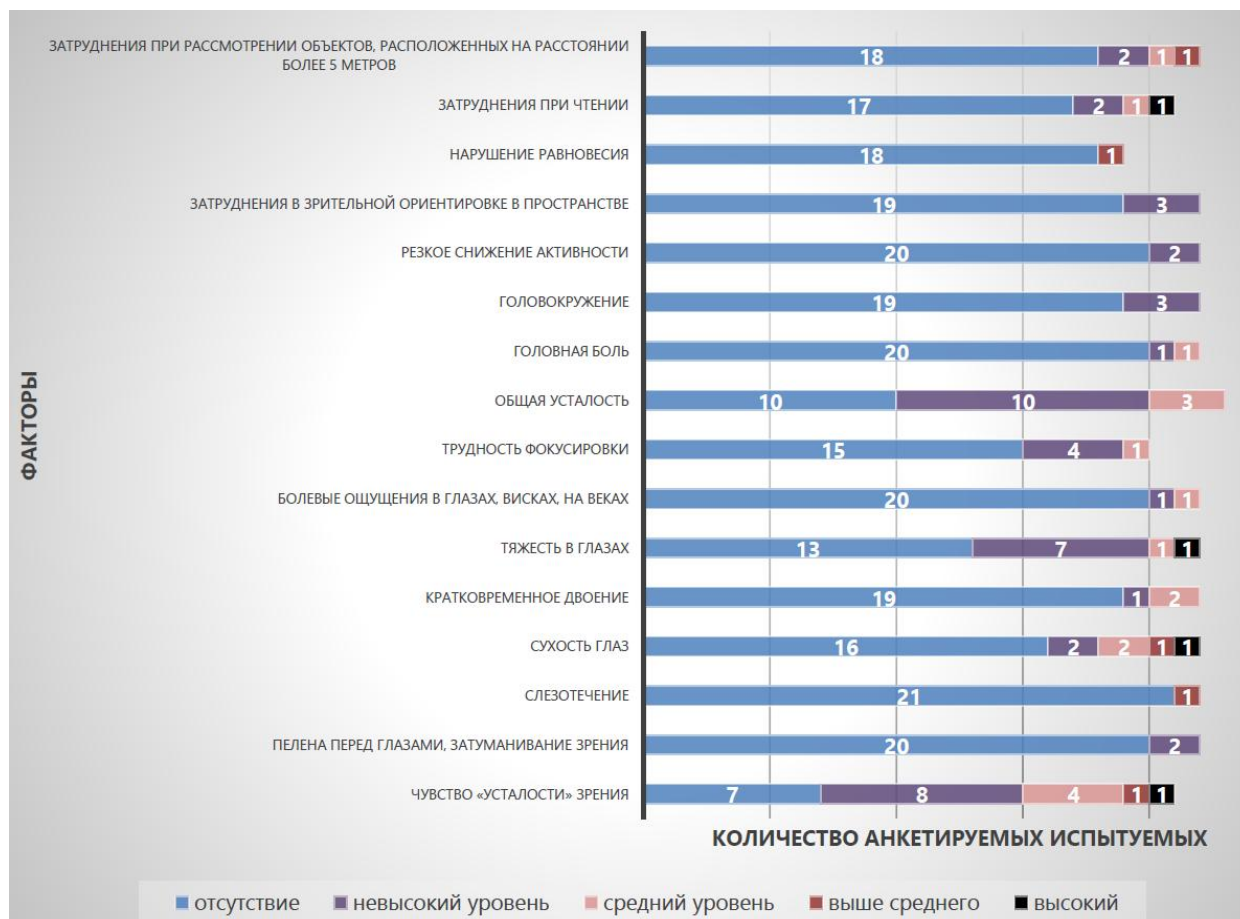


Рис. 8. Оценка эргономичности использования ЗУКТ

Выполнены научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы, обеспечивающие создание нового типа научной аппаратуры – роботов с антропоморфной структурой. Определены и реализованы требования к исполнительной части АР. Разработана архитектура копирующего управления функциональной составляющей робота. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность принятых решений. АР обеспечивает выполнение технологических операций с достаточной точностью и скоростью. Созданный программно-аппаратный комплекс управления АР обеспечивает комфортное выполнение задач управления.

В настоящее время НПО «Андроидная техника», совместно ЦНИИМаш, разрабатывает новую конструкцию АР с модернизированным

задающим устройством, оснащенным обратной силомоментной связью. Целевое назначение АР отработка технологий операционной поддержки деятельности космонавтов вне гермоотсеков. Планируется проведение лётных испытаний в составе модуля НЭМ РС МКС в 2020-2024 гг.



Рис. 9. Взаимное управление SAR-401 и AILA

Цикл исследований, выполненных с использованием макетом оборудования ОС и AILA, подтвердил перспективность применения АР для замены космонавтов при выполнении полетных заданий.

Список литературы

1. Canadarm2, the Canadian Robotic Arm of the International Space Station. [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/canadarm2/> (accessed 24.08.16).
2. Dextre, the International Space Station's Robotic Handyman. [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/dextre/> (accessed 24.08.16).

3. Japanese Experiment Module Remote Manipulator System. [Электронный ресурс]: режим доступа <http://iss.jaxa.jp/en/kibo/about/kibo/rms/> (accessed 24.08.16).
4. Цыганков О. С. Пятидесятилетие внекорабельной деятельности // Космическая техника и технологии. – 2015. – №1(8). – С.3–16.
5. Жиденко И.Г., Кутлубаев И.М. Методика определения сигналов управления антропоморфным манипулятором // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. №5. – С.41-46.
6. Макаров А.Н., Кутлубаев И.М. Механика манипуляционных систем: монография. – Магнитогорск: МГТУ, 1999. – 178 с.
7. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Пермяков А.Ф., Сычков В.Б. Разработка антропоморфного робота с интерактивным управлением // Необратимые процессы в природе и технике. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – С.228–230.
8. Жиденко И.Г., Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Сычков В.Б. / Обоснование выбора структурной схемы роботов космического исполнения. // Решетневские чтения. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2013. – Ч.1. – С.278–280.
9. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Сычков В.Б. Перспективы создания антропоморфных робототехнических систем для работы в космосе // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. №1 (3). – С. 78-84.
10. Бурдин Б. В., Михайлюк М. В., Сохин И. Г., Торгашев М. А. Использование виртуальных 3D-моделей для экспериментальной отработки бортовых полетных операций, выполняемых с помощью антропоморфных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1 (1). – С. 42–46.

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПОДВОДНОГО АППАРАТА К ДОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЗАДАННОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ

Аннотация: Разработана система управления, которая в автоматическом режиме определяет расположение донной поверхности относительно подводного аппарата с помощью доплеровского лага и управляет угловыми перемещениями этого аппарата для задания его ориентации, наиболее удобной для выполнения манипуляционных подводных операций.

Ключевые слова: система управления, подводный аппарат, доплеровский лаг, донная поверхность, автоматический режим, манипуляционная операция

METHOD FOR AUTOMATIC APPROACH OF UNDERWATER VEHICLE TO THE BOTTOM SURFACE WITH A GIVEN ORIENTATION

A.Yu. Konoplin, Ph.D, konoplin.ai@dvfu.ru

N.Yu. Konoplin, konoplin.nikita@gmail.com

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract: The control system, which automatically determines location of the bottom surface relative to underwater vehicle using Doppler log, was developed. This system also controls angular movement of the vehicle to set its orientation which is most convenient for implementation of manipulation underwater operations.

Key words: control system, underwater vehicle, Doppler log, bottom surface, automatic mode, manipulation operation

Сегодня подводная робототехника играет важную роль в исследовании и освоении Мирового океана, причем области ее применения постоянно расширяются за счет роста числа работ, выполняемых подводными аппаратами (ПА) разного типа. Многие отечественные и зарубежные исследователи пришли к выводу, что для решения важных исследовательских и технологических подводных операций в условиях неизвестной и окружающей водной среды необходимо создавать ПА нового поколения, оснащенные подводными манипуляторами (ПМ), способные выполнять поставленные задачи даже без участия оператора.

В настоящее время уже созданы высокоточные системы навигации и автоматического управления перемещениями ПА [1-3]. При этом для выполнения манипуляционных задач в автоматическом режиме необходимо определение расположения объектов работ (ОР) относительно ПА. Для этого в работе [4] предлагается закрепление на ОР специальных маркеров или использование сложных алгоритмов обработки видеоизображения. В [5] при работе ПМ с ОР сложной формы предлагается использовать трудоемкие алгоритмы обработки видеопотоков с нескольких телекамер и световые маркеры, заранее устанавливаемые на ОР, что очень затруднительно. Однако до сих пор не существует легко реализуемых методов, позволяющих определять взаимное расположение и пространственную ориентацию ОР и ПА в процессе погружения или подвода аппарата к ОР при отсутствии визуального контакта с этим объектом. В результате возникает необходимость в создании новых методов, лишенных указанных недостатков.

1. Постановка задачи

В работе ставится задача создания метода синтеза системы управления, позволяющей определять расположение ОР относительно ПА с помощью доплеровского лага, и осуществлять управление угловыми перемещениями ПА для задания его положения, наиболее удобного для выполнения операций.

2. Определение взаиморасположения ПА и поверхности дна

Глубоководные исследования, выполненные с помощью ПА в Японском, Охотском, Беринговом, Чукотском морях и Тихом океане показали, что в подавляющем большинстве случаев манипуляционные операции, ОР для которых служит донная поверхность, выполняется на относительно ровной поверхности морского дна, но имеющей переменный наклон к горизонту (последнее часто затрудняет точное выполнение

поставленных манипуляционных задач). Поэтому необходимо определить взаимное расположение продольной оси ПА и усредненной поверхности дна, которую приближенно можно аппроксимировать плоскостью.

Современные абсолютные доплеровские лаги, имеющие не менее трех гидроакустических антенн, позволяют с высокой точностью определять расстояния от места их крепления на ПА до дна вдоль всех осей этих антенн. Указанные расстояния можно задать в прямоугольной СК $X^*Y^*Z^*$, жестко связанной с корпусом ПА, начало которой - C расположено в центре величины (водоизмещения) ПА, ось X^* совпадает с горизонтальной - продольной осью ПР, ось Z^* - с его вертикальной осью, а Y^* составляет с ними правую тройку. С помощью лага в СК $X^*Y^*Z^*$ можно сформировать массив n точек с координатами x_i, y_i и $z_i, i = \overline{(1, n)}$, принадлежащих донной поверхности.

Для описания усредненной поверхности дна вблизи ПА полученный массив точек был аппроксимирован полиномом первого порядка, используя метод наименьших квадратов [6]. В результате указанная поверхность была описана уравнением плоскости:

$$A^*x + B^*y - z + C^* = 0, \quad (1)$$

где x, y, z – оси прямоугольной СК, A^*, B^*, C^* – одновременно не равные нулю постоянные коэффициенты, рассчитываемые с помощью выражений:

$$A^* = \frac{n \sum_{i=1}^n z_i x_i \sum_{i=1}^n y_i^2 + \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n z_i + \sum_{i=1}^n z_i y_i \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i -}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i -} \\ - \frac{\sum_{i=1}^n z_i \sum_{i=1}^n y_i^2 \sum_{i=1}^n x_i - n \sum_{i=1}^n z_i y_i \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n z_i x_i \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \sum_{i=1}^n y_i^2 - n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}, \\ B^* = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n z_i y_i + \sum_{i=1}^n z_i x_i \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n z_i \sum_{i=1}^n x_i -}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i -}$$

$$\begin{aligned}
C^* = & \frac{-\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 \sum_{i=1}^n z_i y_i - n \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n z_i x_i - \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n z_i}{-\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 \sum_{i=1}^n y_i^2 - n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2 \sum_{i=1}^n x_i^2} \\
& \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2 \sum_{i=1}^n z_i + \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n z_i y_i \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n z_i x_i \sum_{i=1}^n y_i -}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i -} \\
& \frac{-\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i^2 \sum_{i=1}^n z_i x_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)^2 \sum_{i=1}^n z_i - \sum_{i=1}^n z_i y_i \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2}{-\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 \sum_{i=1}^n y_i^2 - n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}.
\end{aligned}$$

Поскольку продольная ось установленного на ПА доплеровского лага всегда параллельна вертикальной оси Z^* , и все точки массива измерений всегда имеют отрицательные координаты z_i , то вектор $\bar{n} = [A^*, B^*, -1]^T \in R^3$ всегда будет перпендикулярен плоскости, описываемой уравнением (1), и будет направлен от точки C СК $X^*Y^*Z^*$ в сторону этой плоскости.

3. Особенности подхода ПА к поверхности дна в зоне работ

Поскольку рабочая зона ПМ, закрепленного на ПА, всегда расположена в его передней полусфере, где устанавливаются основные сенсоры, видеокамеры, фонари и другое оборудование, то при автоматическом подходе ПА к зоне работ вблизи дна ось X^* должна быть всегда направлена в сторону подъема плоскости (1). Это позволяет устранить столкновение ПА с дном, улучшить обзор зоны работ и сохранить большую рабочую зону ПМ.

То есть подход ПА к зоне работ всегда должен обеспечиваться в направлении вектора $\bar{n}^* = [A^*, B^*, 0]^T \in R^3$, изображенного на рис. 1, который является проекцией на плоскость CX^*Y^* вектора $\bar{n}$ - нормали к плоскости (1). Искомый угол θ необходимого разворота ПА относительно оси Z^* (между вектором $\bar{n}^*$ и вектором $x^* = [1, 0, 0] \in R^3$) определяется по выражениям:

$$\theta = \arccos \left(\frac{\bar{n}^* x^*}{\|\bar{n}^*\| \|x^*\|} \right) \text{ при } B^* > 0; \quad \theta = -\arccos \left(\frac{\bar{n}^* x^*}{\|\bar{n}^*\| \|x^*\|} \right) \text{ при } B^* < 0.$$

Поскольку доплеровские лаги позволяют обновлять значения массивов точек, принадлежащих донной поверхности, несколько раз в секунду, то в процессе сближения ПА с этой поверхностью с такой же частотой должны обновляться коэффициенты уравнения плоскости (1).

4. Результаты морских испытаний

В рамках глубоководной экспедиции в Беринговом море с ПА рабочего класса Sub-Atlantic Comanche 18 были проведены морские испытания синтезированной на основе предложенного подхода системы управления.

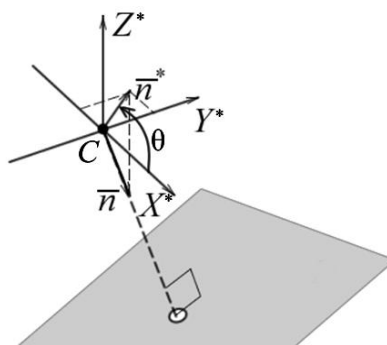


Рис. 1. Определение ориентации ПА при его движении в зону работ

При выполнении эксперимента с использованием доплеровского лага Navigator Teledyne RD Instruments, измеряющего расстояние до дна вдоль осей четырех гидроакустических антенн с частотой до 10 Гц, в СК $X^*Y^*Z^*$ были сформированы массивы принадлежащих донной поверхности точек в процессе заглубления ПА, а также в режиме его зависания вблизи донной поверхности. На основе этих измерений строилась плоскость, характеризующая пространственную ориентацию поверхности дна относительно ПА, и определялся угол θ .

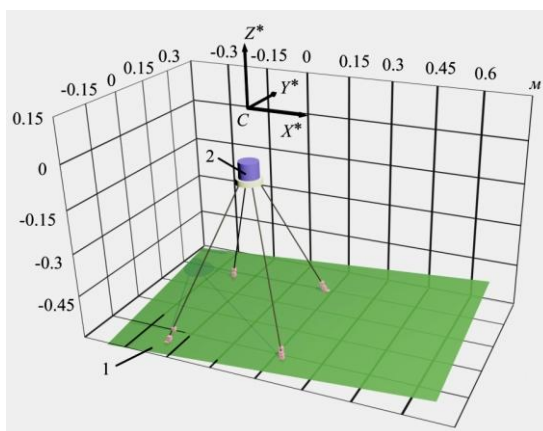


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований

На рис. 2 изображена плоскость 1, построенная в СК $X^*Y^*Z^*$ на основе экспериментальных данных, полученных с доплеровского лага 2 при стабилизации ПА вблизи дна, и описанная уравнением (1) с коэффициентами $A^*=0.1$, $B^*=0.06$, $C^*=0.9$. При этом для ориентации продольной оси ПА в сторону подъема плоскости дна ему нужно было развернуться на угол $\theta=37.59^0$.

Заключение

В работе рассмотрен метод построения системы управления, которая в автоматическом режиме определяет расположение донной поверхности относительно ПА с помощью доплеровского лага и управляет угловыми перемещениями робота для задания его положения, наиболее удобного для выполнения манипуляционных операций. Морские испытания разработанной системы подтвердили ее эффективность и простоту практической реализации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-04195 офи_м.

Список литературы

1. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. – Владивосток: Дальнаука, 2016. – 400 с.
2. Scherbatyuk A., Dubrovin F. «Development of Algorithms for an Autonomous Underwater Vehicle Navigation with a Single Mobile Beacon: The Results of Simulations and Marine Trials». Proc. of the XXIIth International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, Russia, 2015. – pp. 144-152. ISBN 978-5-91995-023-3.
3. Boreyko A., Scherbatyuk A., Moun S. «Precise UUV positioning based on images processing for underwater construction inspection». Proc. of the ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Bangkok, Thailand, 2008. – pp. 14 – 20.
4. Marani G., Choi S.K., and Yuh J. «Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs». Ocean Engineering, vol. 36, no. 1, 2009, pp. 15 – 23.
5. Faria R. O., Kucharczak F., Freitas G. M., Leite A. C., Lizarralde F., Galassi M., From P. J. «A Methodology for Autonomous Robotic Manipulation of Valves Using Visual Sensing». 2nd IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production. Brazil, IFAC-Papers OnLine, Vol. 48, Issue 6, 2015, pp. 221-228.
6. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 304 с.

ПОДХОД К АВТОМАТИЧЕСКОМУ ВЫПОЛНЕНИЮ ПОДВОДНЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ

Аннотация: Работа посвящена разработке и исследованию нового подхода к синтезу системы управления подводным манипуляционным роботом для автоматического взятия проб грунта и образцов геологических пород донной поверхности.

Ключевые слова: система управления, подводный робот, многозвенный манипулятор, автоматический режим, глубоководные исследования

APPROACH FOR AUTOMATIC IMPLEMENTATION OF UNDERWATER MANIPULATIVE OPERATIONS

A.Yu. Konoplin, Ph.D, konoplin.ai@dvfu.ru

N.Yu. Konoplin, konoplin.nikita@gmail.com

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract: The work describes development and research of new approach for control system synthesis of underwater robot equipped with multilink manipulator for taking precipitation samples in automatic mode.

Key words: control system, underwater robot, multilink manipulator, automatic mode, deep-sea research

Введение

В настоящее время проблема автоматического выполнения различных видов манипуляционных операций в глубинах Мирового океана является очень актуальной. Многие исследователи успешно решают задачи создания подводных роботов (ПР), оснащаемых одним или несколькими многозвенными подводными манипуляторами (ПМ) [1,2]. Эти ПР проектируются для выполнения многих технологических и

исследовательских операций. При этом особо важны операции по селективному отбору проб грунта и образцов геологических пород; сбору отдельных видов биоорганизмов; установке и обслуживанию различных приборов; определению состава и плотности грунта с помощью специальных щупов и буров; взятию проб осадков грунтовыми герметично закрывающимися трубками; измерению параметров различных слоев осадочного грунта с помощью термисторных датчиков и др. В подавляющем большинстве случаев все эти операции выполняются специально обученными операторами в ручном режиме. Но, не имея прямого контакта с объектом работ (ОР) и судя о его расположении только по видеоизображению, не удастся быстро и точно решать поставленные задачи.

Известны лишь единичные случаи использования автономных ПР для выполнения даже простейших манипуляционных операций в автоматическом режиме [3]. Сейчас уже разработаны и исследованы системы навигации и точного автоматического управления различными ПР [4, 5]. Созданы методы высокоточного удержания ПР вблизи ОР [6, 7], позволяющие с желаемой пространственной ориентацией фиксировать их в заданной точке пространства без посадки на грунт (без взмучивания придонных слоев). Предложенный в работе [8] метод коррекции траекторий движения ПМ позволяет выполнять манипуляционные операции даже в условиях незапланированных смещений ПР относительно ОР.

Наиболее важным для решения манипуляционных задач в автоматическом режиме является формирование режимов движения ПМ и ПР, исключающих возникновение аварийных ситуаций, на основе определяемых расположения и пространственной ориентации ОР относительно ПР. При этом существующие системы формирования траекторий рабочих органов ПМ на основе систем технического зрения, использующие трудоемкие алгоритмы обработки видеоизображений [3], имеют сложную практическую реализацию и не позволяют выполнять широко распространенные манипуляционные операции. Поэтому необходимо создавать новые эффективные подходы к автоматическому решению указанных манипуляционных задач.

1. Постановка задачи

В докладе ставится задача разработки нового подхода к автоматическому выполнению манипуляционных операций вблизи дна в режиме зависания ПР в водной среде с учетом границ рабочей зоны ПМ.

2. Формирование траекторий движения ПМ при выполнении операций взятия проб грунта

В процессе сближения ПР с ОР необходимо в реальном масштабе времени определять текущее расположение и пространственную ориентацию

поверхности дна относительно этого ПР. Глубоководные исследования показали, что в подавляющем большинстве случаев взятие проб осадочных слоев грунта и образцов геологических пород выполняется на относительно ровной поверхности морского дна, но имеющей переменный наклон к горизонту. В работе [9] показано, что указанную поверхность дна, являющуюся ОР для ПМ, приближенно можно аппроксимировать плоскостью на основе информации с абсолютного доплеровского лага. При этом в прямоугольной системе координат (СК) $X^*Y^*Z^*$, жестко связанной с корпусом ПР, начало которой расположено в центре величины (водоизмещения) ПР, ось X^* совпадает с горизонтальной - продольной осью ПР, ось Z^* - с его вертикальной осью, а Y^* составляет с ними правую тройку, можно определить уравнение этой усредненной плоскости дна в стандартном виде:

$$A^*x + B^*y - z + C^* = 0, \quad (1)$$

где x, y, z – оси прямоугольной СК, A^*, B^* и C^* – одновременно не равные нулю постоянные коэффициенты, вычисляемые с частотой обновления измерений доплеровского лага с помощью метода [9].

В процессе сближения ПР с дном требуется определить место его фиксации вблизи непрерывно рассчитываемой аппроксимирующей плоскости (1) для последующего выполнения манипуляционной операции в режиме зависания, обеспечиваемом системами автоматической стабилизации [6, 7]. При этом необходимо, чтобы ПА зафиксировался как можно дальше от поверхности дна, чтобы избежать столкновений с грунтом и не поднимать вращающимися винтами взвесь, приводящую к ошибкам измерений доплеровского лага. Однако вычисление взаимного расположения плоскости (1) и рабочей зоны ПМ, необходимое для формирования последующей траекторий движения рабочего органа ПМ, затруднено из-за сложных форм этой зоны.

Поэтому для упрощения расчетов рабочую зону ПМ предлагается представить в виде конечного числа s вписанных в нее сегментов, имеющих форму параллелепипедов с одинаковыми основаниями. Вертикальные оси указанных сегментов параллельны оси Z^* СК $X^*Y^*Z^*$. Количество s сегментов должно выбираться с учетом размеров рабочей зоны и габаритов пробоотборников.

Разбитая на сегменты рабочая зона ПМ опказана на рис. 1, где введены следующие обозначения: 1 – реальная поверхность дна; 2 – плоскость, аппроксимирующая поверхность дна 1; P_a – точка подхода рабочего органа ПМ, из которой начинается погружение пробоотборника 3 длиной l с обратным клапаном на верхнем конце в грунт перпендикулярно плоскости 2 до точки M_a , в которой пробоотборник максимально погружен; C_a – точка пересечения вертикальной оси сегмента $a = (1, s)$ и плоскости 2 донной поверхности; 4 – рабочая зона ПМ.

Для каждого сегмента a известны координаты x_{ca}, y_{ca} пересечения его вертикальной оси с плоскостью X^*Y^* СК $X^*Y^*Z^*$. Выразив из выражения (1) z , найдем координату z_{ca} точки C_a пересечения вертикальной оси сегмента a с плоскостью донной поверхности (1) по формуле:

$$z_{ca} = z(x_{ca}, y_{ca}) = A^* x_{ca} + B^* y_{ca} + C^*.$$

Точка C_a с координатами (x_{ca}, y_{ca}, z_{ca}) будет принадлежать рабочей зоне ПМ, если выполняется условие:

$$z_{ca} > z_{ca \min}, \quad (2)$$

где $z_{ca \min}$ - координата нижнего основания сегмента a . Поэтому, как только появляется точка C_a , удовлетворяющая условию (2), ПР должен прекратить заглубление и начать удерживаться в режиме зависания.

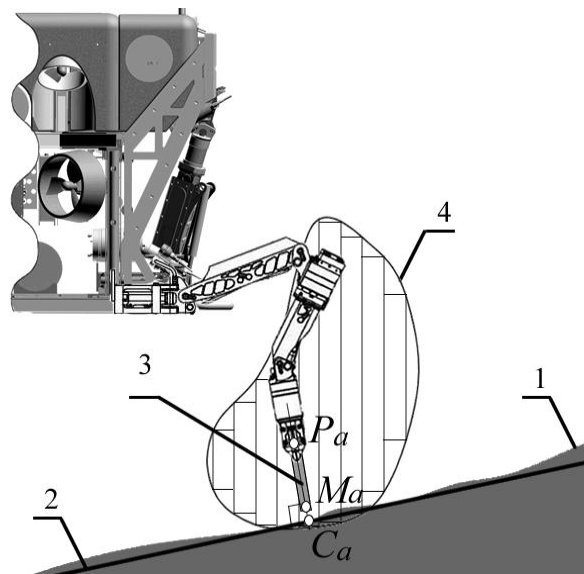


Рис. 1. Схема выполнения манипуляционной операции

После того, как ПР начал удерживаться в режиме зависания, ПМ должен погрузить пробоотборник в грунт перпендикулярно донной поверхности на величину от $0.3l$ до l , затем извлечь и поместить в контейнер [110].

Для точки C_a , принадлежащих рабочей зоне ПМ, найдем точку подхода P_a с координатами (x_{pa}, y_{pa}, z_{pa}) , лежащую на перпендикуляре к плоскости (1), по формуле:

$$P_a = C_a - \frac{\bar{n}}{\|\bar{n}\|} kl, \quad (3)$$

где $\bar{n} = [A^*, B^*, -1]^T \in R^3$ - вектор, перпендикулярный плоскости (1) и направленный от начала СК $X^*Y^*Z^*$ в сторону этой плоскости; $1 < k \leq 1.5$ - коэффициент, зависящий от особенностей поставленной задачи отбора проб.

Например, для отбора верхнего осадочного слоя следует в выражении (3) использовать большее значение k ($1.2 < k \leq 1.5$), что позволит взять качественную пробу ненарушенного слоя. В случае отбора более глубоких образцов геологических пород необходимо использовать меньшее значение k ($1 < k \leq 1.3$) для более глубокого погружения пробоотборника в грунт. Точка P_a проверяется на принадлежность рабочей зоне ПМ, и случае ее отсутствия в этой зоне необходимо выполнить повторный заход ПР в зону работ.

В результате траекторию движения ПМ можно представить в виде последовательности переходов рабочего органа из исходного положения (сложенного положения ПМ) в точку подхода P_a , затем перемещение параллельно вектору $\bar{n}$ на расстояние l в точку M_a , в которой пробоотборник максимально погружен в грунт. Координаты точки M_a рассчитываются по формуле:

$$M_a = P_a + \frac{\bar{n}}{\|\bar{n}\|} l.$$

Для извлечения пробоотборника рабочий орган, не меняя свою ориентацию, переходит сначала в точку P_a , после чего возвращается в исходное положение и помещает пробу в контейнер.

Заключение

Исследование работоспособности и особенностей функционирования предложенного подхода было выполнено в глубоководной экспедиции в Беринговом море с ПР Sub-Atlantic Comanche 18, оснащенным ПМ Schilling Orion 7P, изображенными на рис. 2.

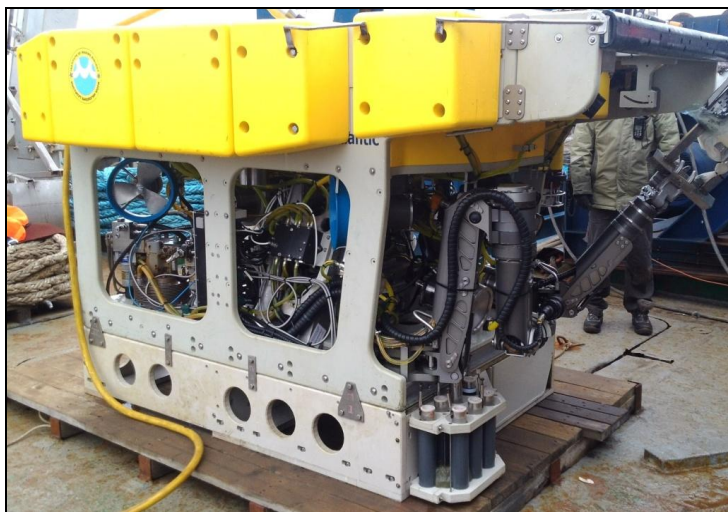


Рис. 2. ПР Comanche 18

Результаты экспериментальных исследований подтвердили работоспособность и простоту практической реализации разработанной системы, которая позволяет гарантированно выполнять отбор проб грунта без участия оператора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-19-00081.

Список литературы

1. Farivarnejad H., Moosavian S. «Multiple impedance control for object manipulation by a dual arm underwater vehicle–manipulator system. Ocean Engineering, 2014. – pp. 82–98.
2. Simetti E., Casalino G. «Whole body control of a dual arm underwater vehicle manipulator system». Annual Reviews in Control 40, 2015, pp. 191–200.
3. Marani G., Choi S.K., and Yuh J. «Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs». Ocean Engineering, vol. 36, no. 1, 2009. – pp. 15 – 23.
4. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. – Владивосток: Дальнаука, 2016. – 400 с.
5. Scherbatyuk A., Dubrovin F. «Development of Algorithms for an Autonomous Underwater Vehicle Navigation with a Single Mobile Beacon: The Results of Simulations and Marine Trials». Proc. of the XXIIth International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, Russia, 2015. – pp. 144-152. ISBN 978–5-91995-023-3.
6. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. «System of Automatic Stabilization of Underwater Vehicle in Hang Mode with Working Multilink Manipulator». Intern. IEEE Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications, Bandung, Indonesia, 2015. – pp. 132-137.
7. McLain T.W., Rock S.M., Lee M.J. «Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system». Autonomous Robots, vol. 3, no. 2-3, 1996. – pp. 213–232.
8. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. «System of Automatically Correction of Program Trajectory of Motion of Multilink Manipulator Installed on Underwater Vehicle»» Procedia Engineering, Vol. 100, 2015. – pp. 1441-1449.
9. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Gorbachev G.V. Control system for underwater vehicle with multilink manipulator for automatic manipulation operations // Proceedings of the 27th DAAAM International Symposium, Mostar, Bosnia and Herzegovina. – 2016. CD-ROM.
10. Eleftheriou A. «Methods for the Study of Marine Benthos». Wiley, 2013. - 496 p.

В.И. Кудымов, д.т.н,
Сибирский федеральный университет, г. Железногорск, Россия
А.В. Владимиров, vladimaleks@mail.ru,
АО «Информационные спутниковые системы»
имени академика М. Ф. Решетнева», г. Железногорск, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация: С целью повышения точности спутниковой навигации автономных мобильных аппаратов получены аналитические выражения возмущений параметров орбит 2-го порядка в гравитационном поле сжатой Земли, на основании которых предложена новая технология повышения точности аналитической теории расчета параметров орбит в полном гравитационном поле Земли.

Ключевые слова: автономные мобильные аппараты, навигация, эфемериды, параметры орбиты, возмущения первого и второго порядка.

SATELLITE NAVIGATION ACCURACY IMPROVING FOR AUTONOMOUS MOBILE MACHINES

V.I. Kudimov, Ph.D,
«Siberian Federal University», Zheleznogorsk, Russia
A.V. Vladimirov, vladimaleks@mail.ru,
JSC Academician M.F. Reshetnev
Information Satellite Systems, Zheleznogorsk, Russia

Abstract: With the aim of satellite navigation accuracy improving for autonomous mobile machines analytic formulas of 2nd order orbit parameters perturbation in field of oblate Earth are developed. New technology is propose for accuracy improving of analytic theory of orbit parameters calculation based on this formulas.

Key words: ephemeris, orbit parameters, perturbation of 1st and 2nd order.

Мобильные робототехнические системы применяются сегодня в самых разных отраслях. Корпоративные заказчики интересуются многофункциональными промышленными роботами, массовый покупатель активно приобретает интеллектуальные пылесосы и роботы-собачки, службы безопасности и спасения рассчитывают на автономные устройства, способные без усталы выполнять задачи слежения и поиска. При этом все

подобные устройства в идеале должны уверенно перемещаться в незнакомой и непредсказуемой обстановке реального мира.

Пока основной проблемой всех ныне существующих мобильных аппаратов, перемещающихся самостоятельно, без управления со стороны человека, остается навигация. Для успешной навигации в пространстве бортовая система робота должна уметь строить маршрут, управлять параметрами движения (задавать угол поворота колес и скорость их вращения), правильно интерпретировать сведения об окружающем мире, получаемые от датчиков, и постоянно отслеживать собственные координаты [1].

Для повышения автономности функционирования мобильных роботов целесообразно использовать глобальную навигацию, обеспечиваемую с помощью глобальных навигационных спутниковых систем, при этом ошибка определения координат робота, в зависимости от поставленной задачи, должна быть в пределах 1 – 2 метров.

Точность, которую на данный момент позволяет достичь ГНСС без использования дополнительных систем коррекции, не в состоянии обеспечить необходимый уровень для решения задач навигации мобильных роботов.

Точность прогнозируемых параметров движения КА, напрямую влияющая на уровень точности определения местоположения, существенно зависит от продолжительности мерного интервала, срока прогноза и полноты учета гравитационного поля Земли [2]. Потребитель навигационной системы получает эфемериды с борта КА. Поэтому срок прогноза эфемерид зависит от момента закладки эфемеридной информации.

Используемые традиционно в решении баллистических задач численные методы расчета параметров движения имеют принципиальный недостаток – это быстрое накопление погрешностей округлений на каждом шаге интегрирования уравнений движения. После того как сделано n шагов численного интегрирования, погрешности в полученных координатах оказываются пропорциональны $n^{3/2}$, иными словами, после 100 шагов интегрирования погрешности определения в исходных значениях координат увеличивается в 1000 раз, т.е. три последних вычисленных знака в результатах будут ошибочными [3]. Систематическое накопление погрешностей в процессе интегрирования ограничивает увеличение мерного интервала. С другой стороны увеличение мерного интервала и учет тонкой структуры гравитационного поля Земли увеличивает в несколько раз время решения задачи по уточнению параметров орбит КА, что приводит к увеличению срока прогноза движения КА для расчетов эфемерид спутника. Увеличение срока прогноза движения КА при расчете эфемерид приводит к уменьшению их точности.

Накопление погрешностей округлений и увеличение времени на определение параметров орбит является одной из основных причин, затрудняющих детальный учёт гравитационных аномалий в уравнениях движения и увеличение мерного интервала радиоконтроля орбит КА.

Выходом из обозначившейся ситуации является использование аналитической теории расчета параметров движения.

Получение аналитических выражений возмущения орбиты осуществляется методом последовательных приближений. Из-за известной сложности получения аналитических выражений на практике ограничиваются только первым приближением, считая при этом элементы орбиты постоянными величинами.

Первым шагом исследований по повышению точности аналитической теории движения ИСЗ является нахождение 2-го приближения для возмущенных элементов от сжатия Земли. Возмущения от сжатия Земли по сравнению с другими возмущениями на три порядка больше.

Приведем необходимые выражения для расчета возмущений в элементах орбиты КА.

Дифференциальные уравнения, определяющие оскулирующие элементы a, e, i, Ω , имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{da}{dt} &= \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial M_0}, \\ \frac{de}{dt} &= \frac{1-e^2}{na^2e} \frac{\partial R}{\partial M_0} - \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2e} \frac{\partial R}{\partial \omega}, \\ \frac{di}{dt} &= \frac{ctgi}{na^2\sqrt{1-e^2}} \frac{\partial R}{\partial \omega} - \frac{coseci}{na^2\sqrt{1-e^2}} \frac{\partial R}{\partial \Omega}, \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{coseci}{na^2\sqrt{1-e^2}} \frac{\partial R}{\partial i}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{ctgi}{na^2\sqrt{1-e^2}} \frac{\partial R}{\partial i} + \frac{\sqrt{1-e^2}}{na^2e} \frac{\partial R}{\partial e}, \\ \frac{dM_0}{dt} &= -\frac{1-e^2}{na^2e} \frac{\partial R}{\partial e} - \frac{2}{na} \frac{\partial R}{\partial a},\end{aligned}\tag{1}$$

$$a = a_0 + \sum A_{jk} \cos(jM + k\omega_0),$$

$$e = e_0 + \sum B_{jk} \cos(jM + k\omega_0),$$

$$i = i_0 + \sum C_{jk} \cos(jM + k\omega_0),$$

$$\Omega = \Omega_0 + \Omega' t + \sum D_{jk} \sin(jM + k\omega_0),$$

$$\pi = \pi_0 + \pi' t + \sum E_{jk} \sin(jM + k\omega_0),$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon' t + \sum F_{jk} \sin(jM + k\omega_0),$$

Для вывода возмущений второго порядка воспользуемся полученными в работе [3] формулами для возмущений первого порядка для элементов орбиты, обусловленных полярным сжатием Земли.

Получим возмущения второго порядка для большой полуоси орбиты. Для этого продифференцируем выражение (2) по средней аномалии M .

$$R = \frac{1}{3}In^2a_e^2 \left(1 - \frac{3}{2}\sin^2(i)\right) \left[1 + \frac{3}{2}e^2 + 3\cos M + \frac{9}{2}e^2 \cos 2M\right] +$$

$$\frac{1}{2}In^2a_e^2\sin^2(i) \left[-\frac{1}{2}e \cos(M + 2\omega) + \left(1 + \frac{5}{2}e^2\right) \cos(2M + 2\omega) + \frac{1}{2}e \cos(3M + 2\omega) + 172e^2 \cos 4M + 2\omega\right]. \quad (2)$$

$\frac{\partial R}{\partial M} = \frac{\partial R}{\partial \lambda_0} =$
 $In^2a_e^2 \left(1 - \frac{3}{2}\sin^2 i\right) [-e \sin M - 3e^2 \sin 2M] + \frac{1}{2}In^2a_e^2\sin^2 i \left[\frac{1}{2}e \sin(M + 2\omega) - 21e^2 \sin 2M + 2\omega - 212e \sin 3M + 2\omega - 34e^2 \sin 4M + 2\omega\right]$
 Разложив правую часть уравнения (3) в окрестности значений элементов a_0, i_0 с удержанием членов, содержащих только первые степени возмущений первого порядка, и подставляя полученное выражение в уравнение Лагранжа определяющее возмущение:

$\frac{da}{dt} = \frac{2}{na} \frac{dR}{d\lambda}$ получим:

$$\frac{da}{dt} = Ia_e k \sqrt{m} \left(a_0^{-\frac{5}{2}} - \frac{5}{2}a_0^{-\frac{1}{2}}\delta_1 a\right) \left(1 - \frac{3}{2}\sin^2 i_0 - 3\sin i_0 \cos i_0 \left(-2(e_0 + \delta e) \sin\left(\lambda_0 + \omega_0 + \delta\lambda - \frac{e\delta_1\omega}{e_0 + \delta e}\right)\right) + Ia_0^2 k \sqrt{m} \left(a_0^{-\frac{5}{2}} - \frac{5}{2}a_0^{-\frac{7}{2}}\delta_1 a\right) \left(\sin^2 i_0 + 2\sin i_0 \cos i_0 \delta_1 i\right) \left(\frac{1}{2}(e_0 + \delta_1 e) \sin\left(M_0 + 2\omega_0 + \delta_1 \lambda_0 + \frac{e\delta_1\omega}{e_0 + \delta e}\right) - 2\sin(2(\lambda + \delta_1 \lambda)) - \frac{21}{2}(e_0 + \delta_1 e) \sin\left(3\bar{\lambda}_0 - \omega_0 + 3\delta_1 \lambda - \frac{e\delta_1\omega}{e_0 + \delta_1 e}\right)\right) = I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{5/2}} \left\{ \left(1 - \frac{3}{2}\sin^2 i_0\right) (-2e_0 \sin M_0) + \sin^2 i_0 \left[\frac{1}{2}e_0 \sin(2M_0 + \omega_0) - 2\sin 2\lambda_0 - \frac{21}{2}e_0 \sin(3\lambda_0 - \omega_0)\right] \right\} + I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{5/2}} \{6\sin i_0 \cos i_0 [e_0 \sin M_0 + \sin i_0 \cos i_0 (-e_0 \sin(\lambda_0 + \omega_0)) - 4e_0 \sin 2\lambda_0 - 21e_0 \sin(\lambda_0 + \omega_0)]\} \delta_1 i + I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{5/2}} \left\{ \left(1 - \frac{3}{2}\sin^2 i_0\right) 5e_0 \sin M_0 + \sin^2 i_0 \left[-\frac{5}{4}e_0 \sin(\lambda_0 + \omega_0) + 5\sin 2\lambda_0 + \frac{105}{4}e_0 \sin(3\lambda_0 - \omega_0)\right] \right\} \frac{\delta a}{a} + I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{5/2}} \left\{ \left(1 - \frac{3}{2}\sin^2 i\right) (-2\sin^2 i) + \sin^2 i \left[\frac{1}{2}\sin(\lambda_0 + \right.$$

$$\begin{aligned} & \omega_0) - \frac{21}{2} \sin(3\lambda_0 - \omega_0) \Big] \Big\} \delta_1 e + I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{5/2}} \left\{ \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i_0 \right) 2 \cos M_0 + \right. \\ & \sin^2 i_0 \left[\frac{1}{2} \cos(\lambda_0 + \omega_0) + \frac{21}{2} \cos(3\lambda_0 - \omega_0) \right] \Big\} e \delta_1 \omega + \\ & I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{5/2}} \left\{ \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i_0 \right) (-2e_0 \cos M_0 + \sin^2 i_0) \left[\frac{1}{2} e \cos(\lambda_0 + \omega_0) - 4 \cos \lambda_0 - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{63}{2} e_0 \cos(3\lambda_0 - \omega_0) \right] \right\} \delta_1 \lambda. \quad (4) \end{aligned}$$

В выражениях (4) входят возмущения в элементах орбиты первого порядка, которые в дальнейшем во внимание принимать не будем. Подставляя в (4) выражения для возмущений первого порядка:

$$\begin{aligned} \delta a &= \frac{a_e^2}{a} I \sin^2 i \cos 2\lambda, \\ \delta k &= -\left(\frac{a_e}{a}\right)^2 I \left[\left(2 - \frac{5}{2} \sin^2 i \right) (1 + \dot{\lambda}) qnt + \left(1 - \frac{1}{4} \sin^2 i \right) \sin \lambda \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{12} \sin^2 i \sin 3\lambda \right], \\ \delta q &= -\left(\frac{a_e}{a}\right)^2 I \left[\left(-2 - \frac{5}{2} \sin^2 i \right) (1 + \lambda^2) knt + \left(1 - \frac{5}{4} \sin^2 i \right) \cos \lambda \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{12} \sin^2 i \cos 3\lambda \right], \\ \delta \Omega &= \left(\frac{a_e}{a}\right)^2 I \cos i \left[(1 + \dot{\lambda}) nt - \frac{1}{2} \sin 2\lambda \right], \\ \delta i &= -\frac{1}{2} \left(\frac{a_e}{a}\right)^2 I \sin i \cos i \cos 2\lambda, \\ \delta \lambda &= -\left(\frac{a_e}{a}\right)^2 I \left[(3 - 4 \sin^2 i) (1 + \dot{\lambda}) nt + \frac{1}{2} \left(-1 + \frac{5}{2} \sin^2 i \right) \sin 2\lambda \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

В (5) и (1) и проводя интегрирование, получим с точностью до постоянной интегрирования возмущения второго порядка в большой полуоси орбиты

$$\frac{\delta_2 a}{a} = I^2 \left(\frac{a_e}{a}\right)^4 \left[\left(\frac{14}{3} \sin^2 i_0 - 7 \sin^4 i_0 \right) \cos 2\lambda_0 + \frac{1}{3} \sin^4 i_0 \cos 4\lambda_0 \right]. \quad (6)$$

При получении выражения (6) были использованы только периодические возмущения первого порядка. Это значит, что при учёте возмущений второго порядка следует рассматривать их, как возмущения относительно среднего движения КА.

Продифференцировав выражение (2) по наклонению орбиты и подставив полученное выражение в уравнение Лагранжа, определяющее возмущение для :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{\cos eci}{na^2} \frac{dR}{dt}, \text{ получим}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{\cos rci}{n^2 a^2 \sqrt{1-e^2}} I k^2 m \frac{a_e^2}{a^3} \sin i \cos i \left[1 + 3e \cos M + \frac{1}{3} e \cos(\lambda + \omega) - \cos 2\lambda - 72e \cos 3\lambda - \omega \right] \quad (7)$$

Разлагая (7) в окрестности значений элементов a_0, i_0 будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{d\Omega}{dt} &= I \frac{a_e k \sqrt{m}}{1} \left(a_0^{-\frac{7}{2}} - \frac{5}{2} a_0^{-\frac{9}{2}} \delta_1 a \right) \left(1 + \frac{1}{2} e_0^2 \right) (\cos i_0 - \sin i_0 \delta_1 i) \left[-1 \right. \\ &\quad - 3(e_0 + \delta e) \cos \left(\lambda_0 + \delta_1 \lambda - \omega_0 - \frac{e \delta \omega}{e_0 + \delta_1 e} \right) \\ &\quad - \frac{1}{2} (e_0 + \delta e) \cos \left(\lambda_0 + \delta_1 \lambda + \omega_0 + \frac{e \delta \omega}{e_0 + \delta_1 e} \right) + \cos(2\lambda_0 + 2\delta_1 \lambda) \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} (e_0 + \delta e) \cos \left(3\lambda_0 + 3\delta_1 \lambda - \omega_0 - \frac{e \delta \omega}{e_0 + \delta_1 e} \right) \right] \\ &= I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{7/2}} \left(1 + \frac{1}{2} e_0^2 \right) \cos i_0 \left[-1 - 3e_0 \cos M_0 - \frac{1}{2} e \cos(\lambda_0 + \omega_0) \right. \\ &\quad + \cos 2\lambda_0 + \frac{7}{2} e_0 \cos(3\lambda_0 - \omega_0) - \frac{1}{2} e \cos(\lambda_0 + \omega_0) + \cos 2\lambda_0 \\ &\quad \left. + \frac{7}{2} e \cos(3\lambda_0 - \omega_0) \right] \delta a \\ &\quad - I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{7/2}} \left(1 + \frac{1}{2} e_0^2 \right) \sin i_0 \left[-1 - 3 \cos(\lambda_0 + \omega_0) + \cos 2\lambda \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} e \cos(3\lambda_0 - \omega_0) \right] \delta_1 i - 2I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{7/2}} \left(1 + \frac{1}{2} e_0^2 \right) \cos i_0 \sin 2\lambda_0 \delta_1 \lambda \\ &\quad + I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{7/2}} \left(1 + \frac{1}{2} e_0^2 \right) \cos i_0 \left[-3 \sin M_0 + \frac{1}{2} \sin(\lambda_0 + \omega_0) \right. \\ &\quad \left. + \frac{7}{2} \sin(3\lambda_0 - \omega_0) \right] e \delta_1 \omega \\ &\quad + I \frac{a_e^2 k \sqrt{m}}{a_0^{7/2}} \left(1 + \frac{1}{2} e_0^2 \right) \cos i_0 \left[-3 \cos M_0 - \frac{1}{2} \cos(\lambda_0 + \omega_0) \right. \\ &\quad \left. + \frac{7}{2} \cos(3\lambda_0 - \omega_0) \right] \delta_1 e. \end{aligned}$$

Интегрируя (7), получим возмущения в узле орбиты второго порядка от влияния сжатия Земли в виде

$$\delta_2 \Omega = I^2 \left(\frac{a_e}{a} \right)^2 \cos i_0 \left[\left(\frac{153}{12} \sin^2 i - 3 \right) nt + \frac{3}{2} \cos^2 i_0 \sin 2\lambda_0 - \frac{1}{8} \left(1 + \frac{1}{3} \sin^2 i \right) \sin 4\lambda_0 \right].$$

При выводе остальных возмущений в элементах орбиты следует воспользоваться возмущающей функцией, выраженной через элементы

$$\begin{aligned} R = \frac{1}{3} I n^2 a_e^2 \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) & \left[1 + \frac{3}{2} (q^2 + k^2) + 3(q \cos \lambda + k \sin \lambda) \right. \\ & + \frac{9}{2} (q^2 + k^2) \cos 2\lambda + 9qk \sin 2\lambda \Big] \\ & + \frac{1}{2} I n^2 a_e^2 \sin^2 i \left[\frac{1}{2} (k \sin \lambda - q \cos \lambda) \right. \\ & + \cos 2\lambda - \frac{5}{2} (q^2 + k^2) \cos 2\lambda + \frac{1}{2} (q \cos 3\lambda + k \sin 3\lambda) \\ & \left. + \frac{17}{2} (q^2 - k^2) \cos 4\lambda + 17qk \sin 4\lambda \right]. \end{aligned}$$

Использование для вывода выражений второго порядка элементов вызвано наличием в первом приближении малого делителя (эксцентриситета орбиты).

По аналогии с предыдущими выводами получим выражения для возмущений второго порядка в элементах:

$$\begin{aligned} \delta_2 i &= \frac{1}{8} I^2 \left(\frac{a_e}{a} \right)^4 \sin 2i \left\{ (6 - 9 \sin^2 i_0) \cos 2\lambda_0 - \left(\frac{5}{12} \sin^2 i_0 + \frac{1}{4} \right) \cos 4\lambda_0 \right\}, \\ \delta_2 k &= \frac{1}{8} I^2 \left(\frac{a_e}{a} \right)^4 \left[\frac{1}{4} \left(19 - \frac{167}{3} \sin^2 i_0 + \frac{491}{12} \sin^4 i_0 \right) \sin \lambda_0 \right. \\ & - \frac{1}{4} \left(1 - \frac{407}{36} \sin^2 i_0 + \frac{1067}{12} \sin^4 i_0 \right) \sin 3\lambda - \frac{1}{4} \left(\frac{7}{12} \sin^2 i_0 \right. \\ & \left. \left. - \frac{17}{24} \sin^4 i_0 \right) \sin 5\lambda_0 \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\delta_2 q = I^2 \left(\frac{a_e}{a} \right)^4 & \left[\left(\frac{21}{4} - \frac{143}{12} \sin^2 i_0 + \frac{317}{48} \sin^4 i_0 \right) \cos \lambda_0 \right. \\
& - \left(\frac{1}{6} - \frac{425}{144} \sin^2 i_0 + \frac{1121}{288} \sin^4 i_0 \right) \cos 3\lambda_0 \\
& \left. - \left(\frac{1}{48} \sin^2 i_0 - \frac{17}{96} \sin^4 i_0 \right) \cos 5\lambda_0 \right], \\
\delta_2 \lambda_0 = I^2 \left(\frac{a_e}{a} \right)^4 & \left\{ \left[\frac{637}{48} \sin^4 i_0 - \frac{263}{12} \sin^2 i_0 + 9 \right] nt + \left[-\frac{47}{8} \sin^4 i_0 + \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{16}{3} \sin^2 i_0 - \frac{3}{2} \right] \sin 2\lambda_0 + \left[\frac{83}{192} \sin^4 i_0 - \frac{1}{48} \sin^2 i_0 + \frac{1}{8} \right] \sin 4\lambda_0 \right\}.
\end{aligned}$$

(8)

Возмущения в большой полуоси будут вызывать в свою очередь возмущения в среднем движении, определяемые формулой

$$\begin{aligned}
\delta_2 \lambda_{\delta_a} &= \int \left(\frac{dn}{dt} \delta_2 a \right) dt \\
&= -\frac{3}{2} I^2 \left(\frac{a_e}{a} \right)^4 \left[\left(-\frac{1}{2} \sin^4 i_0 + \frac{1}{3} \sin^2 i_0 \right) \sin 2\lambda + \frac{1}{12} \sin^4 i_0 \sin 4\lambda_0 \right].
\end{aligned}$$

Полное возмущение второго порядка в среднем движении будет иметь вид

$$\begin{aligned}
\delta_2 \lambda = \delta_2 \lambda_0 + \delta_2 \lambda_{\delta_a} = I^2 \left(\frac{a_e}{a} \right)^4 & \left\{ \left[\frac{637}{48} \sin^4 i_0 - \frac{263}{12} \sin^2 i_0 + 9 \right] nt + \right. \\
& \left[-\frac{5}{8} \sin^4 i_0 + \frac{11}{6} \sin^2 i_0 - \frac{3}{2} \right] \sin 2\lambda_0 + \left[\frac{59}{192} \sin^4 i_0 - \frac{1}{48} \sin^2 i_0 + \frac{1}{8} \right] \sin 4\lambda_0 \Big\}.
\end{aligned}$$

(9)

Пользуясь дифференциальными соотношениями

$$\delta q = \delta e \cos(\omega) - e \delta \omega \sin(\omega),$$

$$\delta k = \delta e \sin(\omega) + e \delta \omega \cos(\omega), \quad (10)$$

найдем возмущения второго порядка для элементов

$$\begin{aligned}
\delta_2 e = I^2 \left(\frac{a_e}{a} \right)^4 & \left\{ \left(\frac{1}{24} + \frac{1}{16} \sin^2 i_0 - \frac{3}{32} \sin^4 i_0 \right) \cos 3\lambda_0 + \left(\frac{1}{4} + \sin^2 i_0 - \right. \right. \\
& \left. \frac{87}{48} \sin^4 i_0 \right) \cos(\lambda_0 + \omega_0) + \left(5 - \frac{155}{12} \sin^2 i_0 + \frac{101}{12} \sin^4 i_0 \right) \cos(\lambda_0 - \omega_0) - \\
& \left(\frac{5}{24} - \frac{26}{9} \sin^2 i_0 + \frac{547}{144} \sin^4 i_0 \right) \cos(3\lambda_0 - \omega_0) - \left(\frac{1}{48} \sin^2 i_0 - \frac{17}{96} \sin^4 i_0 \right) \cos(5\lambda_0 - \\
& \left. \omega_0) \right\},
\end{aligned}$$

(11)

$$\begin{aligned}
e\delta_2\omega = I^2\left(\frac{a_e}{a}\right)^4 & \left\{ \left(5 - \frac{155}{12}\sin^2 i_0 + \frac{101}{12}\sin^4 i_0\right)\sin(\lambda_0 - \omega_0) \right. \\
& - \left(\frac{1}{4} + \sin^2 i_0 - \frac{87}{48}\sin^4 i_0\right)\sin(\lambda_0 + \omega_0) \\
& - \left(\frac{5}{24} - \frac{26}{9}\sin^2 i_0 + \frac{547}{144}\sin^4 i_0\right)\sin(3\lambda_0 - \omega_0) \\
& - \left(\frac{1}{24} + \frac{1}{16}\sin^2 i_0 - \frac{3}{32}\sin^4 i_0\right)\sin(3\lambda_0 + \omega_0) \\
& \left. - \left(\frac{7}{48}\sin^2 i_0 - \frac{17}{96}\sin^4 i_0\right)\sin(5\lambda_0 - \omega_0) \right\}.
\end{aligned}$$

Оценим возмущения второго порядка в элементах для орбиты с параметрами $H_{\text{орб}} = 1000\text{км}, i_{\text{орб}}$

$$\delta_2 a = -25 \cos 2\lambda + 4 \cos 4\lambda,$$

$$a\delta_2 \Omega \approx 0,$$

$$a\delta_2 i \approx \cos 2\lambda, \quad (12)$$

$$a\delta_2 e \approx -6 \cos(\lambda + \omega) + 5 \cos(\lambda - \omega) - 12 \cos(3\lambda - \omega),$$

$$ae\delta_2 \omega \approx 6 \sin(\lambda + \omega) + 5 \sin(\lambda - \omega) - 12 \sin(3\lambda - \omega),$$

$$a\delta_2 \omega \approx -5 \sin 2\lambda - 3 \sin 4\lambda.$$

Из выражений (12) следует, что неучёт возмущений второго порядка при баллистических расчётах приведёт к погрешностям вдоль орбиты и по высоте до 25м. В целом точность расчёта параметров движения по рассмотренной аналитической методике будет зависеть от точности расчёта амплитуд и полноты учёта периодических возмущений.

Проведённые расчёты по сравнению параметров орбит ($H_{\text{орб}} = 1000\text{км}$), рассчитанных численным и аналитическими методиками в гравитационном поле с учётом гармоник до 8 порядка после решения задачи по определению параметров орбит показали, что при учёте возмущений до 5 м суммарная погрешность аналитической методики достигает 45 м, при учёте возмущений до 1,5 м она достигает 30 м. С увеличением высоты орбиты КА методические погрешности метода, как и влияние гравитационного поля, будут уменьшаться. Данная точность приведённой аналитической методики достаточна для решения баллистических задач на больших мерных интервалах. Параметры баллистического обеспечения КА настоятельно требует широкого использования аналитического способа расчёта параметров движения.

Новый подход к решению проблемы повышения точности аналитической теории можно предложить на основании идентичности выражений для основных возмущений 1-го и 2-го порядков (см. формулы 5 и 12). Это свойство позволяет, имея выражения возмущений 1-го порядка по невязкам в элементах орбиты, рассчитанных численным и аналитическим методами определить возмущения 2-го порядка. В качестве методологической поддержки этих исследований могут служить работы по созданию согласующей модели геопотенциала для орбит геодезических КА [4].

Таким образом, полученные результаты позволяют достигнуть повышения точности спутниковой навигации автономных мобильных аппаратов.

Список литературы

1. Бобровский С. Навигация мобильных роботов // PC Week/RE. – № 9–11. – 2004.
2. Урмаев М. С. Орбитальные методы космической геодезии. – М.: Недра, 1981. – 256 с.
3. Чеботарев Г. А. Аналитические и численные методы небесной механики. – М.: Наука, 1965. – 368 с.
4. Кудымов В. И. О выводе согласующей модели геопотенциала для орбит геодезических аппаратов // Геодезия и картография. Т8. – 1990. – С. 14-15.
5. Грушинский Н. П. Теория фигуры Земли. – М.: Наука, 1976. – 512 с.

М.А. Кузьмицкий, д.т.н.,
М.Р. Гизитдинова, д.т.н., kafspa@yandex.ru
Концерн «МПО – Гидроприбор», г. Санкт-Петербург, Россия

ГИБРИДНЫЕ МОБИЛЬНЫЕ ПОДВОДНЫЕ РОБОТЫ: ТРЕНД РАЗВИТИЯ

Аннотация: Рассмотрен спектр основных проблемных задач и перспективы инновационного развития мобильных подводных роботов – гибридов, как нового класса подводной робототехники. Сопоставляются процессы развития гибридных робототехнических систем, близких по выполняемым функциям, но действующих в различных средах.

Ключевые слова: подводная робототехника, инновационное развитие, исследовательское проектирование, синергия, мобильный подводный робот, гибрид.

M.A. Kuzmitskiy, PhD,
M.R. Gizitdinova, PhD, kafspa@yandex.ru
Concern «MPO – Hidropribor», Saint-Petersburg, Russia

HYBRID MOBILE UNDERWATER ROBOTS: DEVELOPMENT TREND

Аннотация: Considered range of basic challenges and perspectives of innovative development of mobile underwater robots – hybrids as a new class of underwater robotics. Compares the processes of the development of hybrid robotic systems with similar functions but operating in different environments.

Ключевые слова: underwater robotics, innovation development, research design, synergy, mobile underwater robot, hybrid

В 80-х гг. XX - начале XXI века заметным явлением стало появление публикаций, освещающих проблемы и методы их разрешения в сложной, ответственной и принципиально не формализуемой области начальных этапов создания современной техники – авиационной, сухопутной, морской. Речь идет о концептуальном анализе и исследовательском проектировании (ИП) сложных технических систем. В сфере военного кораблестроения, например, можно назвать монографии [1-3], в области торпедостроения и подводного аппаратостроения – [4, 5].

Следует отметить, что наряду с анализом специфических для конкретной объектной области науки и техники вопросов, появилось немало публикаций, посвященных общей, междисциплинарной проблематике, отражающей сложности методологического и информационного характера, характерные для этапа ИП [6 - 8].

Реальная эффективность решений, принимаемых в ходе ИП, корреспондируется с понятием их инновационности. Инновация, как известно, - это внедрённое новшество, обеспечивающее качественный рост эффективности, коренное улучшение процессов или продукции.

В качестве инновационного направления развития автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) или, как их сегодня называют, мобильных подводных роботов (МПР) рассматривается создание новых МПР – гибридов, сочетающих в себе (на уровне образца в целом или отдельных функциональных подсистем) полезные свойства ряда уже существующих объектов.

Изначально гибридизация расценивалась как широко используемый эффективный инструмент выведения новых высокопродуктивных представителей растительного и животного мира. В настоящее время подобные идеи активно реализуются в различных областях техники, в том числе мобильной, т.е. самоходной. Задолго до появления мобильных роботов (воздушных, сухопутных, надводных и подводных) время от времени отдельные энтузиасты-новаторы предлагали концепты гибридных мобильных транспортных средств различного целевого назначения. В 1934 г. в СССР был предложен и сегодня получил широкую известность проект гибрида «самолет – подводная лодка» Б.Ушакова, а в начале 60-х гг. XX века в США был построен и прошел испытания экспериментальный образец подобного гибридного типа [9]. К настоящему времени созданы и испытаны многочисленные варианты различных гибридных транспортных средств: автомобиль - самолет [10], автомобиль – вертолет [11], автобус-амфибия [12] и т.д.

Бурный процесс роботизации, приобретающий все большие масштабы и охватывающий все основные области человеческой деятельности (научные исследования, промышленность, военное дело) и все природные среды (космос, атмосферу, сушу, мировой океан), распространил концепцию создания гибридных систем на сферу мобильной робототехники. В США прошел испытания гибрид «автомобиль-вертолет» *Transformer Advanced Tactics* военного назначения (для перевозки грузов и раненых); гибрид может использоваться в беспилотном варианте [13]. Появление гибридов становится заметным явлением и в сфере разработок мобильных подводных роботов (МПР).

Вопрос о том, когда началась история появления и развития МПР, не бесспорен. Есть все основания считать, что МПР ведут свое начало от

первых образцов торпед – самодвижущихся автономных подводных аппаратов военного назначения, т.е. с 1868 года, когда была испытана (неудачно) первая торпеда Р.Уайтхеда [5]. Торпеды длительный период времени сохраняли главные атрибуты роботов – энергетическую и поведенческую автономность, не слишком прогрессируя в части интеллектуализации. Интеллектуализация торпедного оружия стала возможной с появлением микроэлектронных устройств – микропроцессоров, микроконтроллеров и т.д.

МПП в их современном виде – это самоходные автономные необитаемые подводные аппараты. Первый проект МПП был разработан в Вашингтонском университете в 1961 году, т.е. почти через столетие после появления торпед. За прошедшие 55 лет МПП быстро развивались как в отношении повышения энергетической автономности (увеличения оперативного радиуса действия), так и в направлении роста информационно-поведенческой автономности и уровня интеллектуализации. Это позволило МПП занять значимые позиции в составе сил и средств научно-исследовательской, промышленной и военно-морской деятельности на море.

В широком спектре направлений развития МПП можно выделить инновации разной степени новизны, разной глубины решаемых научно-технических задач и разной функциональной специфики. Основные традиционные инновации в развитии МПП связаны с прогрессом в области бортовых источников энергии, информационно-управляющих систем, а также с реализацией гибкой, модифицируемой модульной архитектуры МПП.

Существует еще один продуктивный путь, способствующий появлению и продвижению прогрессивных инноваций – создание гибридных МПП, в которых объединяются решения, хорошо себя зарекомендовавшие в отдельных разноплановых разработках, и объединение которых может создать своего рода синергетический эффект, позволяя погасить внутрисистемные конфликты, усилить позитивные взаимосвязи между отдельными решениями и исключить или, по крайней мере, ослабить негативные.

Как известно, синергизм, синергия (от греч. *συνεργέω* — действовать вместе) – это комбинированный (совместный, суммарный) эффект нескольких компонентов (факторов), превышающий сумму эффектов отдельных компонентов (факторов). **Обычно, когда говорят о синергетическом эффекте, молчаливо подразумевают положительный эффект синергии. Образно выражаясь, можно сказать, что в хорошо организованной системе за счет синергетического эффекта можно рассчитывать на то, что $2 + 2$ будет больше 4. Еще Аристотель говорил, что целое всегда больше суммы его частей.**

В рамках предложенной А.И. Пригожиным классификации инноваций (рис. 1) [14], создание МПП-гибридов, рассматриваемое как инновация,

занимает свое особое место (соответствующие элементы на структурной схеме выделены двойной линией):



Рис.1. Технологии создания гибридных МПР в общей структуре инноваций

В данном контексте понятие «диффузия» трактуется как распространение уже освоенного новшества в новых условиях или на новых объектах внедрения. Учитывая предысторию создания гибридной транспортной техники, управляемой человеком, гибридные инновации в области разработок МПР следует расценивать как ретровведения.

Анализируя направления развития гибридных МПР, можно выделить ряд формирующихся основных трендов, которые показаны на рис. 2.

Нетрудно заметить, что «гибридизация» имеет разный масштаб, охватывая лишь одну или сразу несколько функциональных подсистем МПР. Так, в гибридных МПР №6 на рис. 2 инновации касаются только источника энергии. Обычно речь идет о создании комбинированных

(гибридных) ИЭ: на борту МПР размещают два разных ИЭ – с высокой удельной мощностью для коротких по времени действий на высокой скорости, и ИЭ высокой энергоемкости для длительного плавания на малой скорости.

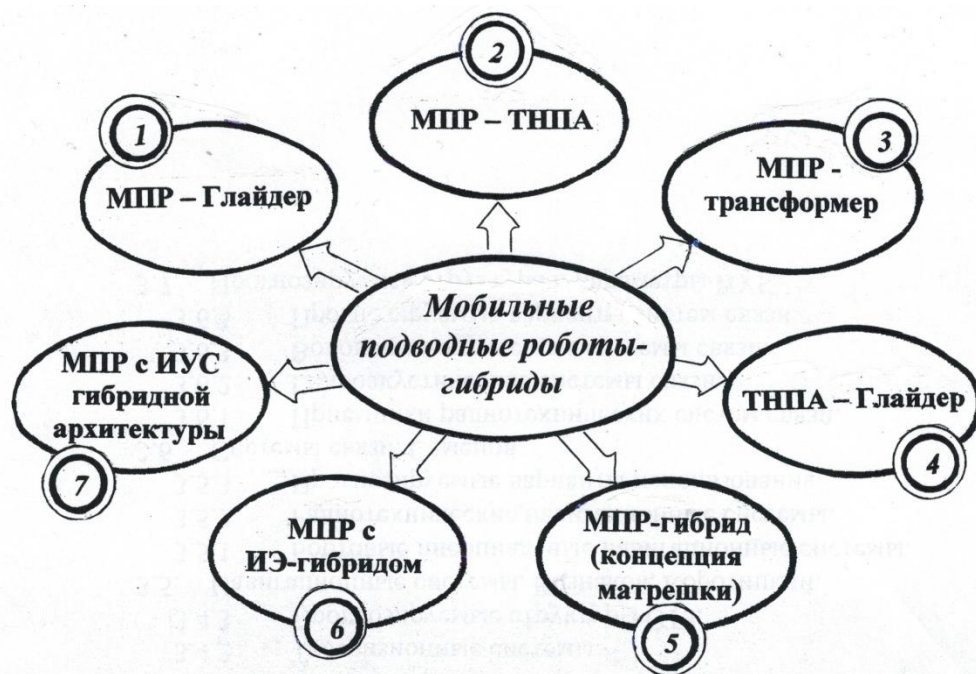


Рис. 2. Основные типы гибридных МПР

ТНПА – телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, ИЭ – источник энергии, ИУС – информационно-управляющая система

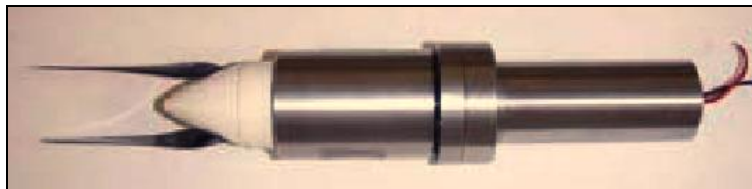
В МПР №7 на рис. 2 речь идет о создании ИУС гибридной архитектуры [15]. Вероятно, наиболее часто реализуемое направление в разработках МПР-гибридов – объединение достоинств собственно МПР (полностью автономных АНПА) с преимуществами ТНПА – телеуправляемых НПА. В этом случае (№2 на рис.2) МПР-гибрид энергетически автономен, а информационно связан с береговым или корабельным постом управления волоконно-оптической линией связи (ВОЛС). Этот вариант гибридизации реализован в многочисленных полуавтономных МПР: *Sabertooth* (SAAB Seaeye Ltd., Швеция), *Hybrid ARV* (Aquabotix,), *SeaCat* (AtlasElektronik GmbH, Германия), *MT-СФ* (ИПМТ ДВО РАН, Россия) [16] и т.д.

Большой практический интерес вызвало появление МПР-гибридов типа №1 на рис. 2. За счет установки на МПР-планер (глайдер) миниатюрной электрической энергосиловой установки (ЭСУ) с гребным винтом удастся объединить в одном НПА способность к сверхдальним переходам в заданный район Мирового океана в планерном режиме (функционирует гравистатическая локомоторная система) с возможностью свободного маневрирования при выполнении тех или иных задач локального масштаба по приходе в этот район (функционирует электрическая ЭСУ). При

длительных переходах в планерном режиме неработающий гребной винт складывается, чтобы не создавать дополнительного сопротивления. Именно такое гибридное решение реализовано в МПР *Slocum G2* (рис. 3) [17].



Общий вид глайдера-гибрида



Гребной винт в сложенном состоянии

Рис. 3. Гибридный МПР *Slocum G2*

МПР-трансформер (№3 на рис. 2) – это гибридный МПР, содержащий в своем составе целый ряд функциональных подсистем, комбинируя которые в различных сочетаниях, можно получить разные конфигурации, т.е. реализовать трансформацию одного типа МПР в другой для выполнения новых задач. Примером реализации такого технического решения может служить летающий подводный аппарат *Flimmer (Flying Submarine)*, разработанный в Naval Research Laboratory (NRL), США (рис. 4) [18].



Общий вид



В полете



После приводнения и погружения

Рис.4. Гибридный МПР *Flimmer (Flying Submarine)*

Концепция «матрешки» реализует идею размещения маломерных МПР в качестве полезной нагрузки большого МПР-носителя. Последний выполняет функцию скрытной доставки маломерных МПР в отдаленный район, где маломерные МПР самостоятельно выполняют те или иные миссии. Пример такого решения иллюстрирует рис.5[19].

Перечисленные варианты гибридных МПР не исчерпывают всего возможного многообразия технических решений. Известен, например, гибридный НПА *Roving BAT (ECAGroup, Франция)* соединяющий в себе способность плавать в толще воды как обычный телеуправляемый НПА с возможностью движения по дну акватории на гусеничном ходу [20]. Гибридный НПА *Submaran (Ocean Aero, США)* способен ходить под

парусом как надводное судно, под водой у поверхности в полупогруженном состоянии и плавать под водой в «сложенном» виде (рис. 6) [21]. Уместно напомнить, что в концептуальном плане эта «новация» имеет давнюю историю: подводная лодка *Nautilus* Роберта Фултона (1800 г.) также могла ходить на поверхности под парусом, сложив парус – погружаться, а под водой перемещаться с помощью гребного винта, который вращали члены экипажа. Действительно, нередко новое – это хорошо забытое старое, реализуемое в условиях новых технологий.



Рис. 5 - Четыре портативных МПР *Gavia* (Исландия) на борту большого МПР *Theseus*



Надводное плавание



Полупогруженный вариант



Подводное плавание

Рис.6 - Гибридный НПА *Submaran*

Поисковые работы в направлении создания гибридных МПР активно продолжаются. Важно, чтобы этот многообещающий тренд развития мобильных подводных роботов привлек внимание отечественных разработчиков мобильной подводной техники.

Список литературы

1. Нарусбаев А.А. Введение в теорию обоснования проектных решений. – Л.: Судостроение, 1976.
2. Худяков Л.Ю. Исследовательское проектирование кораблей. – Л.: Судостроение, 1980.
3. Захаров И.Г. Концептуальный анализ в военном кораблестроении. – СПб: Судостроение, 2001.
4. Илларионов Г.Ю., Карпачев А.А. Исследовательское проектирование необитаемых подводных аппаратов: теория, методы, результаты. – Владивосток: Дальнаука, 1998.
5. Алиев Ш.Г., Боженков Ю.А., Борисенко К.П., Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А. Торпедное оружие, в 6 томах. – М.: Наука, 2002 – 2005.
6. Краснощеков П.С., Петров А.А., Федоров В.В. Информатика и проектирование. – М.: Знание, 1986.
7. Суворов А.И., Валькман Ю.Р. Проблемы интеллектуализации информационных технологий научных исследований сложных объектов. – Киев: Знание, 1990.
8. Борисов А.Н., Алексеев А.В., Вилломс Э.Р., Слядзь Н.Н., Фомин С.А. Интеллектуальные системы автоматизированного проектирования. – Рига: Зинатне, 1993.
9. Гизитдинова М.Р. Планерные автономные необитаемые аппараты ВМС зарубежных стран. Современное состояние и перспективы развития. // Морской сборник - №7 - 2005.
10. Электронный ресурс: режим доступа- <http://cheaton.ru/f21/pervyi-gibrid-samoleta-i-avtomobilya-4592>.
11. Электронный ресурс: режим доступа: - <https://www.youtube.com/watch?v=NNH4Ciyvlvw>.
12. Электронный ресурс: режим доступа: <https://www.drive2.ru/b/288230376152218021/>.
13. Электронный ресурс: режим доступа- <https://www.advancedtacticsinc.com/>.
14. Электронный ресурс: режим доступа- <http://campletitbit.weebly.com/blog/novovvedeniya-stimuli-i-prepyatstviya-prigozhin-ai-fb2>.
15. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследователя подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника -№1(15) -2013.
16. Наумов Л.А., Матвиенко Ю.В. Состояние и перспективы развития работ ИПМТ ДВО РАН по созданию подводных робототехнических средств. // Материалы НТК «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток: Дальнаука, 2011.
17. Электронный ресурс: режим доступа: http://auvac.org/uploads/publication_pdf/JonesUUST11%20Slocum%20Glider.pdf.
18. Электронный ресурс: режим доступа- www.nrl.navy.mil/spectra – Naval Research Laboratory - Spectra_Winter_2014.pdf.
19. Ferguson, J.S. Brief Look at AUVs Over the Past 30 Years and An Outlook for the Next Decade / J.S. Ferguson // World Maritime Technology Conference WMTC2012, Saint-Petersburg, 2012.
20. Электронный ресурс: режим доступа- www.ecahytec.com - Hybrid ROV for inspection and cleaning / AUV_ROV.pdf.
21. Электронный ресурс: режим доступа- <http://auvac.org/configurations/view/253>.

А.А. Медведев, инженер-конструктор, директор, longeron72@mail.ru
ООО «Вираз», г. Железнодорожск, Россия
В.А. Углев, к.т.н., доцент, uglev-v@yandex.ru
Сибирский федеральный университет, г. Железнодорожск, Россия

АВТОЖИР КАК ОБЪЕКТ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АВТОПИЛОТА

Аннотация: В статье рассматривается автожир, как объект для создания автопилота. Описывается специфика разработки автопилота, учитывающая конструктивные особенности автожира

Ключевые слова: автожир, полёт, автопилот, интеллектуальное управление

Gyriplane as a object to autopilot creation

A.A. Medvedev, ingeneer, director, longeron72@mail.ru
“VIRAGE” company, Zheleznogorsk, Russia
V.A. Uglev, PhD, docent, uglev-v@yandex.ru
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

Abstract: the article discusses the gyroplane (autogyro), as the object for autopilot creation. Describes the specifics of the development of the autopilot, taking into account the constructive-wide characteristics of the gyroplane.

Key words: gyroplane, autogyro, flight, autopilot, intelligent control

Рынок летательных аппаратов на сегодняшний день широко представлен пилотируемыми и беспилотными моделями самолётов и вертолётов: начиная от детских игрушек и оканчивая боевыми дронами. Если рассматривать модели, ориентированные на транспортирование людей и грузов, то они активно используются государственными и частными владельцами. Не смотря на это, у данных моделей летательных аппаратов есть существенные недостатки. Во-первых, это высокая стоимость и значительные эксплуатационные затраты (особенно при найме). Во-вторых, это высокий процент аварийности за счёт специфики конструкции. В-третьих, это необходимость в инфраструктуре (площадки, полосы, ангары и пр.). И в-четвёртых, это сложность обучения по управлению соответствующим классом летательных аппаратов. Во многом эти проблемы относятся и к дирижаблям. Попытка перейти на персональные летательные

аппараты (например, реактивные ранцы или махолёты) сталкиваются со сложностями, касающимися безопасности и дальности полёта [1].

Альтернативой указанным классам летательных аппаратов является автожир. Это такой винтокрылый летательный аппарат, в полёте опирающийся на несущую поверхность свободновращающегося в режиме авторотации несущего винта [2]. В конструктивном плане, он является промежуточной формой между вертолётom и лёгким самолётom и может быть исполнен как с крыльями, так и без них (несущий винт обязателен, рис. 1). Автожир имеет преимущества перед лёгкими самолётами и вертолётами по указанным выше недостаткам. Главное – он значительно безопаснее и имеет существенно меньше аварийных режимов полёта (разгрузка ротора, кувырок, мертвая зона авторотации и пр.). Единственное, в чём он уступает традиционно применяемым летательным аппаратам (при условии корректного проектирования и грамотного управления) – это более низкое КПД использования силовой установки, что приводит к снижению скорости полёта или к необходимости ставить более мощный и тяжелый двигатель. Несмотря на вышесказанное, в мире, и особенно в нашей стране, автожиры не получили широкого распространения. В связи с этим возникает вопрос: возможно ли использовать автожир в беспилотном режиме, т.е. в режиме автопилота? Попробуем разобраться.



Рис. 1. Вариант конструкции автожира

Управление автожиром осуществляется с помощью изменения наклона плоскости вращения несущего винта (изменения по тангажу и крену). Это приводит к изменению направления линии вектора подъёмной силы ротора относительно центра тяжести аппарата и вся система переходит к новому равновесному положению в пространстве (по аналогии с управлением

вертолёт). Рыскание аппарата управляется за счёт изменения положения киля[2]. Очевидно, что, в отличие от вертолёт, «зависать» над одной точкой такой аппарат не способен, хотя исключением можно назвать условие зависание автожира при встречном ветре при определенной скорости. Несмотря на это, как показывает анализ предметной области, для автожира до сих пор автопилот не был создан.

Конструктивная специфика автожира не позволяют перенести на него автопилот для самолёта (см. рис. 2). Это связано с тем, что и аэродинамические характеристики автожира, и режимы его полёта (как штатные, так и аварийные) значительно различаются. Аналогичная ситуация обстоит с переносом на автожир автопилота для вертолёт, хотя конструктивно она более приемлема [3], но принципы управления существенно отличаются. Исходя из этой специфики, попробуем описать пространство входных данных, которые автопилот должен комплексно анализировать:



Рис. 2. Малый беспилотный автожир производства ООО «Вираз» без несущего винта (масштаб 1:1,25 относительно пилотируемого варианта исполнения)

1. координаты XYZ (гироскоп);
2. данные с высотомера относительно уровня моря;
3. данные с лазерного высотомера относительно земной поверхности;
4. данные с указателя горизонтальной воздушной скорости;
5. данные с указателя скорости относительно земной поверхности;
6. данные с указателя вертикальной скорости подъема-спуска (вариометр);
7. данные с компаса и указателя направления ветра;
8. координаты положения с бортового навигатора;
9. параметры канала связи;
10. данные с тахометра двигателя;
11. данные с системы телеметрических датчиков;
12. данные с датчика оборотов ротора;
13. данные с датчика температуры двигателя;
14. электронные карты местности;
15. данные с системы контроля двигателя (запуск-прогрев-глушение).

Тогда выходными данными будут:

1. уровень газа двигателя аппарата;
2. руль направления осей X (крен), Y (рыскание) и Z (тангаж);
3. телеметрический кадр;
4. отчёт о самодиагностике;
5. индикатор переключения между режимами полёта;
6. электронные карты местности с наложенным маршрутом и текущим положением автожира.

Очевидно, что система должна быть укомплектована акустическими колонками с микрофоном, современным ЖК-дисплеем и, возможно, сенсорным экраном.

Бортовое программное обеспечение, реализующую функции автономного управления и сбора данных с датчиков (телеметрии) должно, по аналогии с [4], обеспечивать следующие основные функции:

- управление положением и перемещением по заданной траектории аппарата в автономном режиме;
- парировать нештатные ситуации (например, стабилизировать курс или гашение колебаний) и обеспечивать аварийную посадку;
- осуществлять сбор телеметрической информации и обеспечивать канал связи;
- автоматически прокладывать маршрут с учётом требований безопасности и законности;
- информировать оператора и/или пассажиров о ходе полёта и его траектории;
- обучать (подсказывать решения) по управлению аппаратом в режиме обучения.

Отдельные из указанных функций предполагают наличие интеллектуальных алгоритмов управления. Комплексный анализ исходных данных и выработка решений реализуются как с использованием механизма экспертных систем, так и с элементами нейросетевого управления.

Разработка автопилота для автожира, включающего интеллектуальную систему поддержки принятия решений, позволит не только выполнять функции автономного транспортирования людей и грузов, но и может выступать в качестве гида и даже тренажёра-инструктора. Всё это открывает принципиально новые возможности для малой гражданской авиации пилотируемого и беспилотного вариантов исполнения автожира.

Список литературы

1. Пак А.А., Углев В.А. Свободный полёт: к вопросу о технических сложностях создания махолёта // Интеллект и наука: Материалы XIV Всероссийской научной конференции с международным участием. - Железногорск: Филиал СФУ, 2014. - С. 30-32.
2. Камов Н. И. Винтовые летательные аппараты (автожиры и вертолеты). – М.: Оборонгиз, 1948. - 207 с.
3. Автопилот вертолёта [Электронный ресурс]: режим доступа – <http://avia.pro/blog/avtopilot-vertoleta>.
4. Самонов С.С., Углев В.А., Князькин Ю.М. Интеллектуальная бортовая система поддержки принятия решений транспортирования космических аппаратов // Исследования наукограда. – №2 (12). – 2015. – С.37-43.

Е.А. Шушляпин, д.т.н., профессор, 6u6@bk.ru,
В.А. Карапетян, к.т.н., доцент, karvalart@mail.ru
А.А. Афонина, аспирант, a.afonina@ubk.su
И.Ю. Филлер, аспирант, felix3987@gmail.com

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

ЗАДАЧИ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДОХОДСТВА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СУДНА «ПИОНЕР-М»

Аннотация: сформулированы задачи проектирования безэкипажного научно-исследовательского судна, предназначенного для работы в акватории Черного моря, на реках и озерах; судно данного назначения «Пионер-М», предполагающее экипаж и группу НИР общим числом 10 человек, в настоящее время проходит стадию утверждения эскизного проекта. Одновременно проводятся НИР, обеспечивающие безэкипажный режим его работы; сформулированы задачи прокладки маршрута судна и автоматическое удержания его на заданной траектории, а также обхода внезапно появившихся препятствий; сформирована математическая модель судна, учитывающая его массо-габаритные и тяговые характеристики.

Ключевые слова: безэкипажное судно, автоматическое управление судном, нелинейные системы, математическая модель судна

THE PROBLEM OF UNMANNED NAVIGATION AND A MATHEMATICAL MODEL RESEARCH VESSEL "PIONEER-M"

E. A. Shushlyapin, Ph. D., Professor, 6u6@bk.ru,
V. A. Karapetian, Ph. D., associate Professor, karvalart@mail.ru
A. A. Afonina, graduate student, a.afonina@ubk.su
I. J. Filler, graduate student, felix3987@gmail.com
Sevastopol state University, Sevastopol, Russia

Abstract: formulated the problem of designing unmanned research vessel designed to operate in the Black sea, on rivers and lakes; the ship of the appointment of a "Pioneer-M", involving the crew and the research group a total of 10 people, is currently undergoing STA-dia the approval of the draft design. At the same time conducted R & d to ensure unmanned operation mode; formulated the problem of routing of vessel and auto

hold it on a predetermined path and bypass suddenly appearing obstacles; the formed mathematical model of the vessel, taking into account its mass-dimensional characteristics and traction.

Key words: unmanned vessel, automatic ship control, nonlinear systems, mathematical model of the vessel

Научно-исследовательское малотоннажное судно «Пионер-М», работы по которому в настоящее время находятся на стадии утверждения эскизного проекта, предназначены для научно-исследовательских работ в акватории Черного моря и на других водоемах (в том числе на реках и озерах). На первом этапе предполагается эксплуатация судна с использованием экипажа из трех человек и семи научных сотрудников. На втором этапе, после ввода судна в эксплуатацию, предусмотрено его использование в безэкипажном режиме, когда все этапы – от загрузки судна до автоматического причаливания по его возвращении в порт, – осуществляются с максимальным использованием роботизированных средств: робокаров, роботизированных лебедок, сменных научно-исследовательских модулей, средств автоматического и автоматизированного судовождения и т.д.

В настоящем докладе представлен перечень задач фундаментального характера, решение которых необходимо для планирования траекторий движения судна «Пионер-М» в безэкипажном режиме и обеспечения его движения по заданной траектории с учетом возможных препятствий и ограничений статического и динамического характера. В рамках указанного направления в настоящее время проводится госбюджетная НИР «Разработка алгоритмической части системы управления движением судна по маршруту». Задачами, решаемыми в данной теме, являются:

- анализ структуры и форматов электронных навигационных карт, используемых в современных электронных картографических системах, и их информационного обеспечения;
- разработка алгоритмов прокладки разомкнутых и замкнутых маршрутов с целью обхода по допустимым маршрутам точек обсервации, а также обхода возникших по ходу движения препятствий;
- разработка комплекса математических моделей судна: от нелинейной, учитывающей массо-габаритные и тяговые характеристики судна, до частных моделей, рекомендуемых [1] для разработки алгоритмов автоматического управления;
- разработка алгоритмов обработки видеоизображений препятствий на морской поверхности с целью идентификации препятствий (в том числе людей), определения их скорости и курса.

Кроме упомянутых задач, в рамках НИР разрабатываются и алгоритмы автоматического причаливания судна.

Для выполнения задач удержания судна на запланированной траектории, а также обхода динамических препятствий, необходимы математические модели судна – нелинейная для выполнения так называемых «сильных» маневров, и линейные для «слабых» маневров. При этом «слабые» маневры осуществляются при отклонении, под воздействием ветра и волн, траектории судна от заданного прямолинейного или криволинейного со слабой кривизной маршрутов. «Сильные» маневры производятся при обходе внезапно возникших препятствий либо при движении по заданному маршруту с сильной кривизной.

Ниже описана процедура построения нелинейной модели, учитывающей массовые, геометрические и другие особенности судна "Пионер-М", связанные с тем, что указанную модель предполагается использовать как для управления курсом при «сильных» маневрах, так и для идентификации частных моделей судна (линейной и нелинейных моделей Номото [1]). Поскольку нелинейные модели Номото также рекомендуются для использования при «сильных» маневрах, появляется возможность сравнить соответствующие результаты управления. Для построения модели использованы рекомендации, изложенные в [1, 2], а также техническая документация эскизного проекта судна, где приведены массогабаритные и тяговые характеристики судна, а также результаты его моделирования в профессиональной среде OpenFOAM.

Математическая модель судна "Пионер-М" построена на основе сложившихся методик [1, 2] с учетом следующих особенностей:

- судно является катамараном;
- движение и управление судном по курсу осуществляется посредством двух винто-рулевых колонок (ВРК) для каждого из корпусов катамарана;
- потребный упор винта 20,4 Кн;
- геометрические характеристики судна: длина между перпендикулярами 22,30 м; ширина одного корпуса 3,6 м; ширина наибольшая 10,8 м; высота борта 3,6 м; осадка по КВЛ 1,55 м;
- зависимость сопротивления судна R_K от скорости хода V , полученная путем моделирования судна в среде OpenFOAM.

На рис. изображена кинематическая схема движения судна, где (X_1, Y_1) – неподвижная система координат и (X, Y) – система координат, связанная с судном. На схеме показаны углы: φ_V – угол вектора скорости в координатах (X_1, Y_1) ; K – угол курса; β – угол дрейфа. Связь между углами определяется выражением $\varphi_V = K - \beta$. Судно движется в направлении скорости V , имеющей составляющие V_x, V_y продольного и поперечного движений соответственно. На схеме также показаны проекции на горизонтальную поверхность винто-рулевых колонок, повернутых на углы δ_1, δ_2 соответственно. Винты колонок создают упоры T_{v1}, T_{v2} (на рисунке для

удобства отображения показаны $-Tv_1, -Tv_2$), которые разложены на продольные Tv_{1X}, Tv_{2X} и поперечные Tv_{1Y}, Tv_{2Y} составляющие.

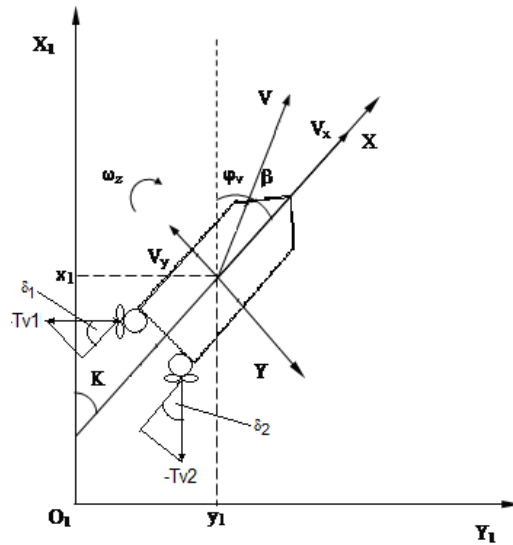


Рис. Оси координат и схема движения судна

Согласно [1, 2] инерционные силы P_{Ix}, P_{Iy} и момент M_I на корпусе определяются выражениями:

$$\begin{aligned} P_{Ix} &= -m_x \frac{dV_x}{dt} - m_y \omega_{PU} V_y, \\ P_{Iy} &= -m_y \frac{dV_y}{dt} - m_x \omega_{PU} V_x, \\ M_I &= -J_\omega \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

где m_x, m_y – массы судна с учетом присоединенных масс в продольном и поперечном движениях; $\omega \equiv \omega_z$ – угловая скорость вращения судна относительно центра масс в горизонтальной плоскости (при отсутствии течения $\omega_{PU} \equiv \omega$); V_x, V_y – проекции скорости судна V относительно воды на продольную и поперечную оси судна; $D=155$ тонн – весовое водоизмещение (масса) судна.

Массы из (1) определяются соотношениями:

$$m_x = (1 + k_{11})D, \quad m_y = (1 + k_{22})D, \quad J_\omega = (1 + k_{66})J_Z, \quad (2)$$

где J_Z – момент инерции судна, а коэффициенты присоединенных масс выбираются из диапазонов: $k_{11} = 0.05 \div 0.15$; $k_{22} = 0.7 \div 1.2$; $k_{66} = 0.6 \div 1.3$.

В первых двух уравнениях (1) учтены силы, вызываемые ускорениями в изменениях величин линейной и угловой скоростей (первые слагаемые) и определяемые центростремительным ускорением центробежной силы (вторые слагаемые).

Инерционным силам препятствует **сила сопротивления**, которая для судна «Пионер-М» может быть аппроксимирована зависимостью:

$$R_K(V) = 8,1 - 8,436 \cdot V + 2,536 \cdot V^2. \quad (3)$$

Продольная и боковая составляющие позиционной силы (при отсутствии аэродинамической подъемной силы), с учетом того, что зависимость (3) отображает сопротивление одного корпуса катамарана, вычисляются по выражению [1]:

$$R_x = 2R_K \cos \beta, \quad R_y = 2R_K \sin \beta, \quad (4)$$

где β – угол дрейфа, определяемый выражением:

$$\beta = \arctg\left(\frac{V_y}{V_x}\right). \quad (5)$$

Момент позиционной силы:

$$M_K = R_y \cdot l_K, \quad l_K = l_{ЦБС} + k_{Ц} L \left(0,5 - \frac{\beta}{\pi}\right). \quad (6)$$

Здесь ЦБС – центр бокового сопротивления. В (6) l_K – расстояние от точки приложения позиционной силы до центра масс (ЦМ); $l_{ЦБС}$ – расстояние от ЦБС до ЦМ; $k_{Ц} \approx 0,4 \div 0,5$. При посадке на ровный киль ЦБС и ЦМ практически находятся в плоскости мидель-шпангоута, т.е. $l_{ЦБС} \approx 0$.

Момент демпфирующей силы определяется выражением [2]:

$$M_D = -C_{M\omega}^{\omega} \frac{\rho}{2} V A_{L\sigma} L^2 \omega, \quad C_{M\omega}^{\omega} = \left(0,739 + 8,7 \frac{T_M}{L}\right) (1,611\sigma^2 - 2,873\sigma + 1,33), \quad (7)$$

где коэффициент демпфирующего момента $C_{M\omega}^{\omega}$ получен на базе испытаний самоходных двухвинтовых моделей судов; σ – приведенный коэффициент полноты погруженной части диаметральной плоскости судна; T_M – осадка на миделе; V – линейная скорость судна; $A_{L\sigma} = LT_M \sigma$ – приведенная площадь погруженной части ДП судна. Из документации эскизного проекта «Пионер-М» следует, что $C_{M\omega}^{\omega} = 0,148$ и $A_{L\sigma} = 24,092$.

Силы и моменты от винто-рулевых колонок определим в соответствии с рис. 1. Очевидно, что продольные и поперечные составляющие сил равны суммам проекций упоров каждой из колонок на соответствующие оси, т.е. $Tv_x = Tv1_x + Tv2_x$ для продольной составляющей и $Tv_y = Tv1_y + Tv2_y$ для поперечной составляющей, где:

$$Tv1_x = Tv1 \cdot \cos(\delta_1), \quad Tv1_y = Tv1 \cdot \sin(\delta_1), \quad (8)$$

$$Tv2_x = Tv2 \cdot \cos(\delta_2), \quad Tv2_y = Tv2 \cdot \sin(\delta_2) \quad (9)$$

Момент M_{RUD} , в соответствии с [1], является суммой двух моментов:

$$M_{RUD} = M_{rud} + M_R, \quad (10)$$

где M_{rud} – произведение суммы поперечных сил упора на плечо, равное расстоянию от ВРК до центра масс судна $M_{rud} = (Tv1\sin(\delta_1) + Tv2\sin(\delta_2)) \cdot L / 2$;

M_R – произведение разности продольных сил упора винтов ВРК на плечо, равное половинному расстоянию между ВРК (расстоянию до центра масс) $M_R = (Tv1 \cdot \cos(\delta_1) - Tv2 \cdot \cos(\delta_2)) \cdot R_v / 2$. Здесь $R_v = 7,2$ м

Согласно [1] и приведенным выше выражениям, полная математическая модель, без учета ветровых и волновых воздействий, а также приводов винто-рулевых колонок, имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= \frac{Tv1_x + Tv2_x - R_x - m_y V_y \omega}{m_x}, \quad \frac{dV_y}{dt} = \frac{Tv1_y + Tv2_y - R_y - m_x V_x \cdot \omega}{m_y}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{M_{RUD} + M_R + M_K + M_D - (m_x - m_y) V_x V_y}{J_\omega}, \quad \frac{dx_1}{dt} = V \cdot \cos(K - \beta(V_x, V_y)), \\ \frac{dy_1}{dt} &= V \cdot \sin(K - \beta(V_x, V_y)), \quad \frac{dK}{dt} = \omega, \end{aligned} \quad (11)$$

где $Tv1_x, Tv2_x, Tv1_y, Tv2_y$ определяются выражениями (8), (9); R_x, R_y – выражениями (3), (4); момент M_{RUD} – выражением (10); момент M_K – выражением (6) с $l_{ЦБС} = 0, K_{Ц} = 0,4$; момент M_D – выражением (7); угол дрейфа β – выражением (5).

В (11), помимо первых трех дифференциальных уравнений для скоростей, в соответствии с [2], добавлены три дифференциальных уравнения для положения ЦМ судна в неподвижной системе координат x_1, y_1 , а также угла курса K .

Модель (11) является нелинейной и содержит четыре управляющих воздействия: упоры $Tv1, Tv2$ и углы поворота δ_1, δ_2 левой и правой ВРК соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и Объединенной судостроительной корпорации в рамках научного проекта № АААА-А16-116081910041-0.

Список литературы

1. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. – 3-е изд., перераб. и доп. – Одесса: Феникс, 2007. – 238 с.
2. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 544с.

Секция 3

СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В УПРАВЛЕНИИ РОБОТАМИ И В ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

З.И. Самигулина, Ph.D, zarinasamigulina@mail.ru

А.М. Шулбаева, магистрант, ashulbaeva@bk.ru

Казахский национальный технический исследовательский университет
имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан

АВТОМАТИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Аннотация: В настоящее время актуально применение современных методов искусственного интеллекта для разработки автоматизированных систем управления сложными объектами. В статье представлена интеллектуальная система управления процессом очистки углеводородных газов на основе нечеткой логики и микропроцессорной техники фирмы SchneiderElectric. Система управления реализована в пакете прикладных программ UnityPro.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нечеткая логика, сложные объекты, очистка углеводородных газов, программируемый логический контроллер

AUTOMATION OF THE COMPLEX OBJECTS IN OIL AND GAS INDUSTRY USING METHODS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Z.I. Samigulina, Ph.D, zarinasamigulina@mail.ru

A.M. Shulbaeva, master, ashulbaeva@bk.ru

Kazakh National Technical Research University named K.I.Satpaev,
Almaty, Republic of Kazakhstan

Annotation: Nowadays is actual to usage of the modern methods of the artificial intelligence for development of the automated control systems of the complex objects. The article presents an intelligent control system of the hydrocarbon gas purification process based on the fuzzy logic and microprocessor techniques of the Schneider Electric company. The control system was implemented by usage Unity Pro application software.

Keywords: artificial intelligence, fuzzy logic, complex objects, cleaning of hydrocarbon gases, a programmable logic controller.

Современные методы искусственного интеллекта(ИИ) находят широкое применение для создания автоматизированных систем управления сложными объектами. К методам искусственного интеллекта относятся: искусственные нейронные сети (ИНС) [1], генетические алгоритмы (ГА) [2-

3], искусственные иммунные системы (ИИС) [4,7],роевой интеллект (РИ) и др.

На ряду с биологическими подходами широко применяется метод ИИ на основе нечеткой логики (НЛ) [5]. Главным преимуществом нечетких регуляторов является возможность управления сложными объектами с плохо изученной динамикой на основе подходов, базирующихся на знаниях. Идея нечеткого управления при этом сводится к моделированию поведения человека-эксперта, способного управлять объектом, не зная его математической модели. Эксперт формулирует свои действия по управлению в виде некоторых лингвистических правил, представляемых затем с помощью аппарата нечеткой логики [6].

Таким образом, методы нечеткой логики, теории нечетких множеств и отношений в настоящее время широко применяются при моделировании систем управления и распознавания, то есть там где необходимо оценивать ситуацию и принимать решение в условиях неточной информации или при наличии нечетких целей и ограничений [5,6].

Рассмотрим технологический процесс по очистке углеводородных газов на базе месторождения Тенгиз, которое входит в десятку крупнейших разведанных нефтяных меторождений в мире и является самым глубоким из них. Завод состоит из трех комплексно - технологических линий (КТЛ-1, КТЛ-2, КТЛ-2,3) (Рис. 1).

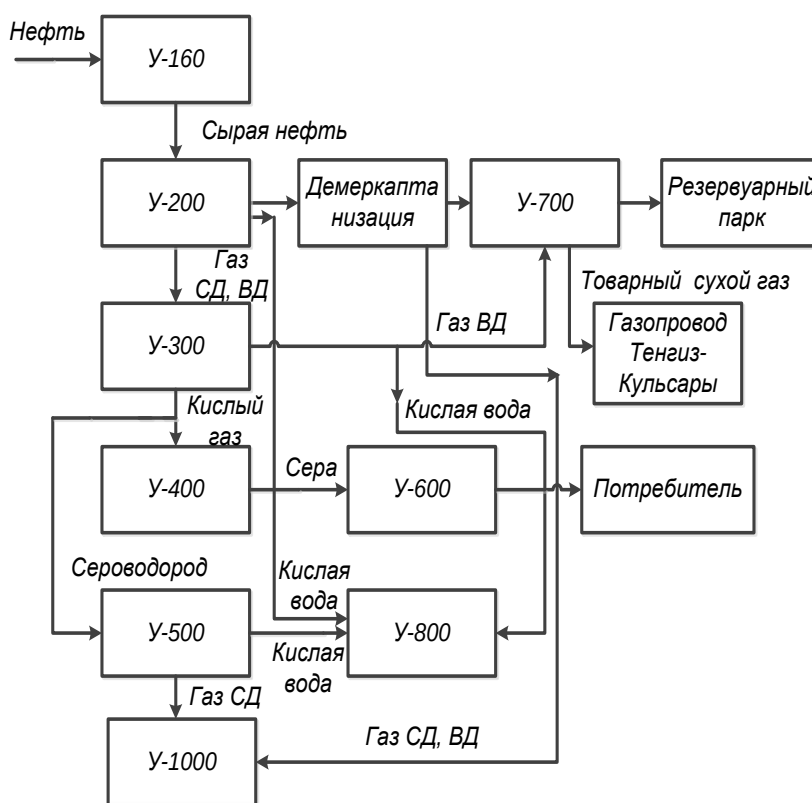


Рис. 1. Блок – схема завода «Тенгизшевройл»

В состав КТЛ входят: установки (У) 160 - слаг-кетчеры; У 200 - для сепарации, обессоливания, стабилизации нефти; компрессорный блок, У300 - для очистки газов высокого, среднего и низкого давлений от сероводорода; У400 - узел получения жидкой серы; У500 - утилизация хвостовых газов; У 700 - осушка и фракционирование обессеренного газа; У800 - обработка кислой воды и т.д.

В качестве объекта управления рассмотрим установку У 300, по очистке углеводородных газов от кислых компонентов – H_2S и CO_2 – циркулирующим раствором диэтаноламина (ДЭА). Сероводород необходимо удалить из газов из-за его токсичности, коррозионной активности и способности загрязнять окружающую среду. Газ на очистку поступает в абсорбционную колонну (Рис.2). В абсорбер из сборника регенерированного абсорбента одновременно подается насосом жидкий поглотитель. В абсорбере в результате контакта газа с жидким поглотителем происходит извлечение из газа серосодержащих компонентов. Насыщенный поглотитель поступает в блок десорбции, конденсации и разделения, где происходит разделение поглотителя и извлекаемого компонента. Регенерированный поглотитель возвращается в сборник регенерированного абсорбента, а рекуперированный растворитель направляется в сборник рекуперации.



Рис. 2. Принципиальная схема рекуперации абсорбционным методом

Постановка задачи исследований формулируется следующим образом. Необходимо разработать систему автоматизированного управления для регулирования температуры и давления в абсорбере, а так же времени

пребывания газа в абсорбере за счет управления на основе современных методов искусственного интеллекта и микропроцессорной техники фирмы SchneiderElectric.

Для решения поставленной задачи с учетом требований к технологическому процессу разработана база правил, фрагмент которой на формальном языке представлен в Таблице 1.

Таблица 1. Фрагмент базы данных правил

№	Наименование правила
Правило 1	Если температура абсорбции малая ($10 - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$), давление в абсорбере приемлемое ($3,5 - 6,5\text{ МПа}$), а время пребывания газа в абсорбере большое ($1,25 - 2\text{ сек.}$), то эффективность процесса абсорбции будет средней ($30 - 65\%$).
Правило 2	Если температура абсорбции приемлемая ($25 - 65\text{ }^{\circ}\text{C}$), давление в абсорбере приемлемое, а время пребывания газа в абсорбере минимальное ($0 - 0,75\text{ сек.}$), то эффективность процесса абсорбции будет малой ($15 - 45\%$).
Правило 3	Если температура абсорбции очень большая ($65 - 90\text{ }^{\circ}\text{C}$), давление в абсорбере очень большое ($7,5 - 10,5\text{ МПа}$), а время пребывания газа в абсорбере среднее ($0,75 - 1,25\text{ сек.}$), то эффективность процесса абсорбции будет средней.
...	...
Правило 20	Если температура абсорбции малая, давление в абсорбере приемлемое, а время пребывания газа в абсорбере минимальное, то эффективность процесса абсорбции будет малой.

Далее на основе разработанной базы правил реализована система автоматизированного управления процессом очистки углеводородных газов с помощью оборудования фирмы SchneiderElectric. Структурная схема процесса управления представлена на Рис.3.

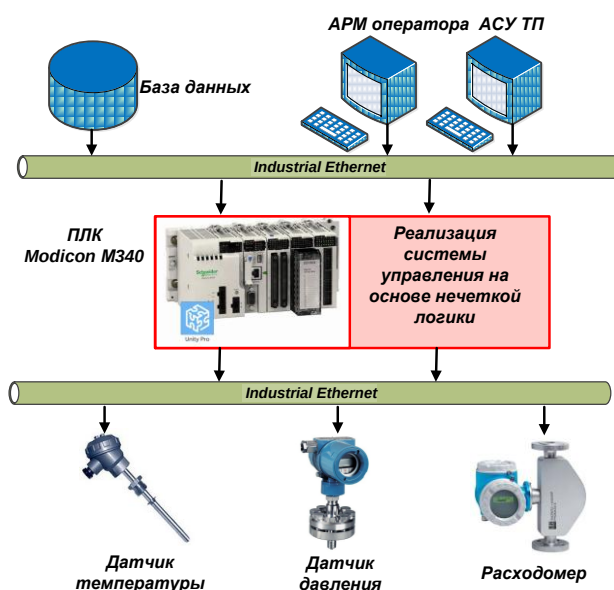


Рис. 3. Структурная схема системы управления на основе нечеткой логики

Система управления на основе нечеткой логики реализована в программируемом логическом контроллере ModiconM340, который связан с датчиками и исполнительными механизмами системы [8].

В пакете прикладных программ UnityPro представлена нечеткая база правил на языке StructuredText (ST) международного стандарта IEC 61131-3 [9, 10]. Результаты работы алгоритма показаны на Рис.4.

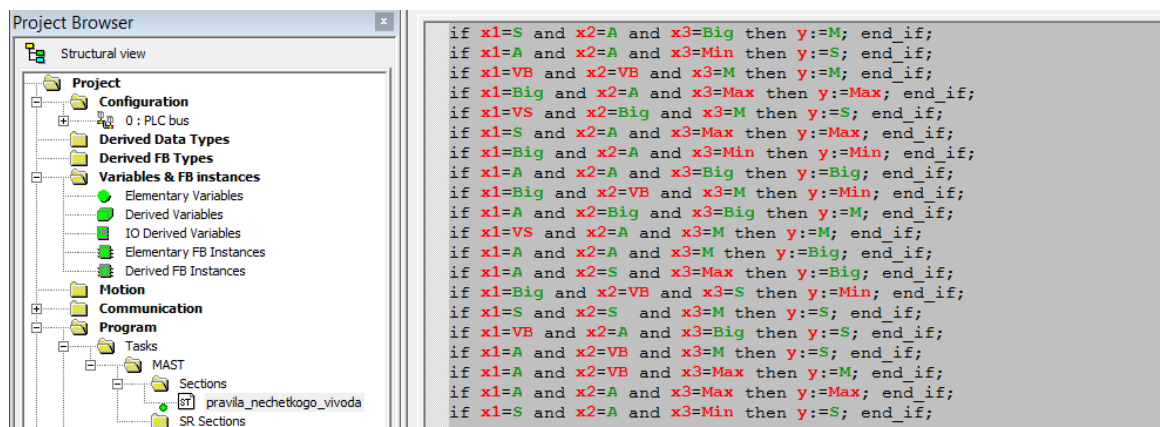


Рис.4. Фрагмент листинга программы в среде UnityPro

Визуализация работы автоматизированной системы управления разработана в операторском экране UnityPro и представляет собой анимированные объекты для обеспечения визуального представления процесса управления температурой диэтилоламина в установке 300 (Рис. 5). С помощью операторского экрана возможно дистанционное управление оборудованием и настройка параметров системы управления.

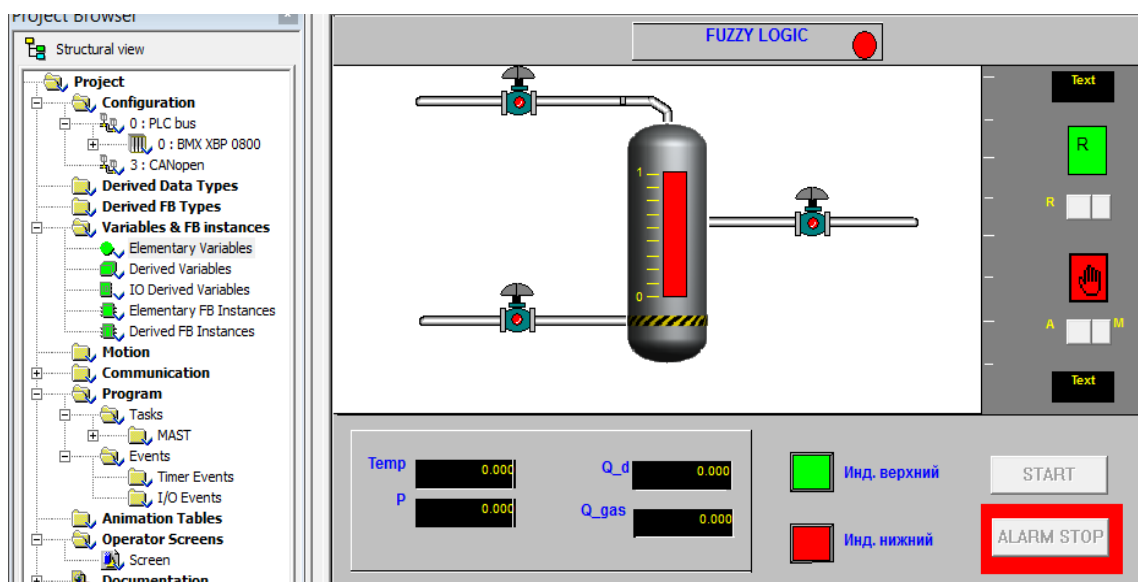


Рис. 5. Графический интерфейс в среде UnityPro

Таким образом, представленная система автоматизированного управления на основе современного метода искусственного интеллекта

нечеткой логики и промышленного оборудования фирмы SchneiderElectric позволяет регулировать температуру абсорбционной колонны на заданном интервале. Данный подход, позволяет создавать системы управления нелинейными объектами, снижает вероятность ошибки функционирования алгоритмов управления и позволяет повышать быстродействие процессов управления.

Список литературы

1. Ткаченко М.Г. Применение искусственной нейронной сети, оптимизированной генетическим алгоритмом, в задаче анализа состояния технологического оборудования нефтегазодобывающей промышленности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. - №7. - С. 262-270.
2. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. – М.: Наука, 2006. – С. 3.
3. Потапов А.С. Технологии искусственного интеллекта. - Санкт-Петербург, 2010. - 218 с.
4. Samigulina G.A., Samigulina Z.I. Word Implementation of Intellectual Immune Network Technology Controlling the Complex Objects // IEEE 8th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT2014. -Astana, 2014. -P. 344-347.
5. Жданов А.А., Караваев М. В. Применение нечеткой логики в имитационной системе автономного адаптивного управления. // Труды Института системного программирования РАН. – 2002. – т.3.
6. Ткаченко М.Г. Применение искусственной нейронной сети, оптимизированной генетическим алгоритмом, в задаче анализа состояния технологического оборудования нефтегазодобывающей промышленности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. - №7. - С. 262-270.
7. Samigulina G.A., Samigulina Z.I. Industrial implementation of the immune network modeling of complex objects on the equipment Schneider Electric and Siemens //International Congress on Systems Immunology, Immunoinformatics and Immune-computation, July 17-18. - Italy, Taormina, 2015.
8. Самигулина З.И., Шулбаева А.М. Разработка системы автоматизированного управления процессом очистки углеводородного газа на основе нечеткой логики // Труды IIМеждународнойнаучно-практической конференции"Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты". - Кемерово, 2016.
9. АО «Шнейдер Электрик». Руководство по решениям в автоматизации. Практические аспекты систем управления технологическими процессами /Под ред. Фролова Ю.А., Хохловского В.Н. –М., <http://www.schneiderelectric.ru>.
10. P. Warin, Introduction to Industrial Automation, Schneider Electric, Moscow, 2005.

Н.С.Устинов, магистр , ustinov2113@rambler.ru
Ю.В.Идрисова, к.т.н., доцент, yu.v.idrisova@mail.ru
С.И.Фецак, к.т.н., доцент, format_invest@mail.ru

Уфимский государственный авиационный университет, г. Уфа, Россия

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ МЕХАТРОННЫХ СТАНКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация: Технической диагностикой оборудования называется обследование технического устройства, эксплуатируемого на опасном производственном объекте или являющегося им, с целью определения его состояния, а именно: наличие дефектов и повреждений; определение степени износа; правильность функционирования и другое.

Диагностирующим признаком является амплитуда и частота колебаний элементов оборудования в процессе работы. Диагностика осуществляется путем сравнения фактического спектра колебаний рабочих органов станка и эталонного спектра, полученного по диагностической модели оборудования. Обработка диагностической информации с использованием искусственных нейронных сетей позволяет проводить оценку технического состояния модулей станка, в режиме реального времени.

Ключевые слова: вибродиагностика, нейронная сеть, спектр колебаний, вынужденные колебаний.

DIAGNOSTIC SYSTEM OF MECHATRONIC MACHINES WITH USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

N.S. Ustinov, magister, ustinov2113@rambler.ru
Y.V. Idrisova, candidate of technical Sciences., docent, yu.v.idrisova@mail.ru
S.I. Fetsak, candidate of technical Sciences., docent, format_invest@mail.ru
Ufa state aviation technical university, Ufa, Russia

Abstract: Technical diagnostics of equipment called a test of technical devices operated at hazardous production facilities, or is it, in order to determine its condition, namely the existence of defects and damages; determination of the degree of wear; correct operation and more.

The diagnostic symptom is the amplitude and frequency of vibration of items of equipment in the process. Diagnosis is performed by comparing the actual spectrum of oscillations of the working bodies of the machine and a reference spectrum obtained for

the diagnostic model of equipment. Processing of diagnostic information using artificial neural networks allows to assess the technical condition of the modules of the machine, in real-time. Key words: vibration diagnostics, neural network, spectrum of oscillations, forced oscillations.

Key words: vibration diagnostics, neural network, the spectrum of vibrations, forced vibrations.

В современном мире масштабы автоматизации производства растут с каждым днём. Внедрение систем автоматизированного управления технологическими процессами на производстве уже стало насущной необходимостью для поддержания объёма и качества выпускаемой продукции на высоте. Эта тенденция, наряду с извечным стремлением человека познать себя и своё мышление, породила стремление к адаптации систем искусственного интеллекта к нуждам производства. Изыскания в этой области начались во второй половине прошлого столетия с попыток смоделировать работу головного мозга [1].

Лучшее понимание функционирования нейрона и картины его связей позволило исследователям создать математические модели для проверки теорий о функционировании человеческого мозга. В первых же работах выяснилось, что эти модели не только повторяют функции мозга, но и способны выполнять функции, имеющие свою собственную ценность. Параллельно с прогрессом в нейроанатомии и нейрофизиологии психологами были созданы модели человеческого обучения. Одной из таких моделей была модель Д. Хэбба, который в 1949г. предложил закон обучения, явившийся стартовой точкой для алгоритмов обучения искусственных нейронных сетей. В наше время системы искусственного интеллекта (ИИ), конечно же, не являются панацеей от всех бед: спектр их применения весьма ограничен. Однако непрерывные исследования в этой области и стремление интегрировать системы ИИ во все сферы жизни дают основание полагать, что эта область знаний получит практическое применение.

ВИБРОДИАГНОСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В общем случае система диагностики оборудования по спектрам вибраций состоит из следующих основных блоков (рис. 1) [2]:

- источник вибросигналов (ИВ);
- блок преобразования;
- блок обработки информации о техническом состоянии;
- блок вывода диагностической информации.

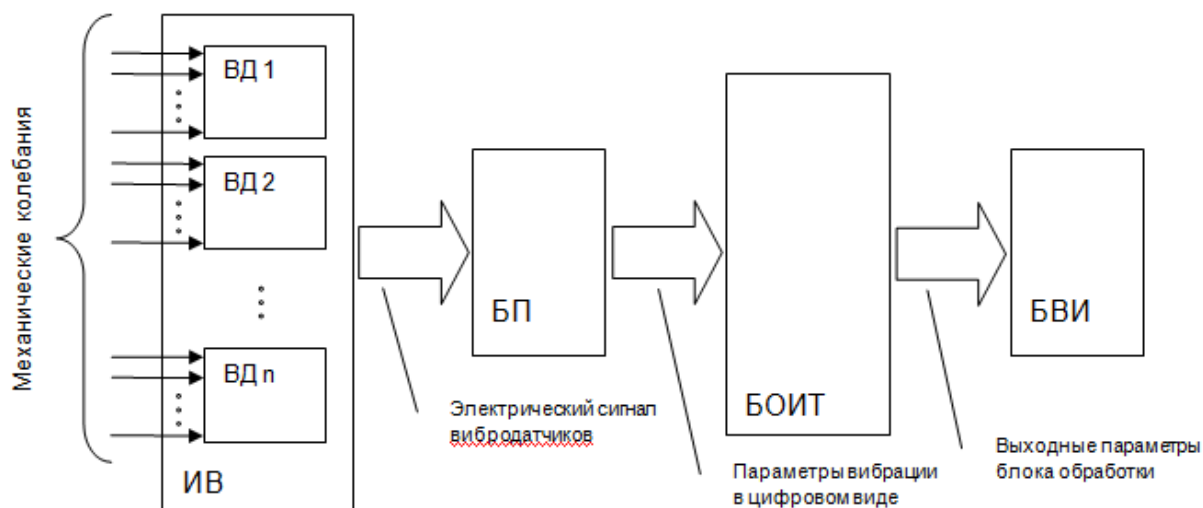


Рис. 1. Структура системы вибродиагностики

ВД – вибродатчик, БП – блок преобразования, БОИТ – блок обработки информации о техническом состоянии, БВИ – блок вывода диагностической информации

В качестве источника вибросигналов в подавляющем большинстве случаев выступает система вибродатчиков (ВД). Вибродатчик – прибор, формирующий на выходе электрический сигнал, форма и характеристики которого соответствует исследуемым механическим колебаниям.

Блок преобразования (БП) – устройство или комплекс устройств, предназначенных для перевода исходного сигнала вибродатчиков в удобный для цифровой обработки формат. Это может быть персональный компьютер с установленной звуковой картой и необходимым программным обеспечением, или, в случае необходимости повышения точности, последовательность узконаправленных аналоговых устройств, реализующих функции аналог-цифрового преобразования, разложения в ряд Фурье и т.д.

Блок обработки информации о техническом состоянии (БОИТ) – блок, служащий для собственно определения технического состояния диагностируемого оборудования по заранее заданным правилам; главный объект автоматизации. В качестве этого блока может служить система ИИ: экспертная система нечёткого вывода, как было описано выше, или нейронная сеть, обученная на диагностику ряда неисправностей.

Блок вывода диагностической информации (БВИ) – устройство или ряд устройств для окончательного вывода сведений о неисправностях диагностируемого оборудования. В роли этого блока может выступать экран персонального компьютера, принтер для формирования отчётов, или электронный архив.

В рамках данной работы предлагается система, в которой блок преобразования, блок обработки информации и блок вывода представлены единым устройством – персональным компьютером со встроенной звуковой картой. Дело в том, что для случаев, не требующих особой точности сохранения сигнала, возможностей встроенной карты достаточно. Так же

применение персонального компьютера в составе системы позволяет объединить несколько функций, таких как спектральное преобразование, составление диагностической картины, хранение и выдача данных – в одном устройстве. Для определения вида неисправности предлагается применить искусственную нейронную сеть.

ВИБРОВОЗМУЩЕНИЯ В ПРИВОДАХ МЕХАТРОННЫХ СТАНКОВ

Вибровозмущение – это возмущения, которые действуют на упругую систему станка и приводят к колебаниям инструмента или обрабатываемой детали, что в свою очередь является причиной ухудшения качества обрабатываемой поверхности детали.

В приводах станков источниками вибровозмущений являются погрешности изготовления и сборки такие как [3]:

1. Неуравновешенность шпинделя и деталей привода;
2. Погрешность изготовления и сборки зубчатых и ременных передач;
3. Погрешности изготовления и сборки элементов электродвигателей;
4. Погрешности изготовления и сборки подшипников качения и т.д.

Результатом вибровозмущений является амплитуда и частота.

Математическую модель указанного источника колебания представляют в виде амплитудно-частотных спектров разложения, в ряд Фурье выражений возмущающих сил.

В соответствии с теорией неидеальных радиально-упорных шарикоподшипников с погрешностями макрогеометрии амплитудный спектр радиальных вибровозмущений, генерируемых радиальноупорными подшипниками, представлен в таблице 1.

При расчете данного спектра вибровозмущений были получены эталонные значения частоты (Гц) и амплитуды (Н), а также случайным образом были выбраны значения частот и амплитуды, для нештатной ситуации (резкое возрастание оборотов – плавление сепаратора, повреждение колец подшипника, повреждение шариков, увеличение температуры масла, повреждение шейки валов, приложение силы резания).

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ПАКЕТЕ STATISTICA 8.0

Statistica — программный пакет для статистического анализа, разработанный компанией *StatSoft*, реализующий функции анализа данных, управления данными, добычи данных и визуализации данных [4].

Таблица 1. **Вибровозмущение возникающие в подшипниках качения**

Наименование дефекта, порождающего возмущение	Формулы для определения		
	номера гармоники	частоты возмущения, Гц	амплитуды возмущения, Н
Волнистость наружного кольца	$\lambda = kn + 1$ $\lambda = kn - 1,$ $k = 1, 2 \dots$	$(\lambda - 1)f_H$ $(\lambda + 1)f_H$	$K_\lambda \alpha_\lambda$
Волнистость внутреннего кольца	$\chi = kn + 1,$ $k = 0, 1 \dots$ $\chi = kn - 1,$ $k = 1, 2 \dots$	$\chi f_B + f_H$ $\chi f_B - f_H$	$K_\lambda \alpha_\chi$
Волнистость наружного и внутреннего кольца	$\lambda + \chi + 1 = kn$ $\lambda + \chi - 1 = kn$ $ \lambda - \chi + 1 = kn $ $k = 1, 2 \dots$ $\lambda - \chi - 1 = kn$ $k = 0, 1 \dots$	$ \lambda f_H - \chi f_B + f_H $ $ \lambda f_H - \chi f_B - f_H $ $\lambda f_H + \chi f_B + f_H$ $ \lambda f_H + \chi f_B - f_H $	$\frac{K_\chi}{4\delta} (ctg\tau) \alpha_\lambda \alpha_\chi$
Волнистость шариков	$\xi = 2, 4, 6$	$\xi f_{ш} \pm f_H$	$K_\chi \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi n \cos \tau}} \alpha_\xi$
Разноразмерность шариков	$\xi = 0$	f_H	$\frac{K_\chi}{3\sqrt{2n \cos \tau}} \Delta$
Разноразмерность шариков при взаимодействии с наружным и внутренним кольцами	$\xi = 0; \lambda \pm 1 = kn$ $\xi = 0; \lambda \pm 1 \neq kn$ $k = 1, 2 \dots$ $\xi = 0; \chi \pm 1 = kn$ $\xi = 0; \chi \pm 1 \neq kn$ $k = 0, 1 \dots$	$(\lambda \pm 1)f_H$ $\chi f_B \pm f_H$	$\frac{K_\chi ctg\tau}{3\pi\sqrt{2n\delta}} \alpha_\lambda \Delta$ $\frac{K_\chi ctg\tau}{12\sqrt{2n\delta}} \alpha_\lambda \Delta$ $\frac{K_\chi ctg\tau}{3\pi\sqrt{2n\delta}} \alpha_\chi \Delta$ $\frac{K_\chi ctg\tau}{12\sqrt{2n\delta}} \alpha_\chi \Delta$

Пакет обладает широкими графическими возможностями, позволяет выводить информацию в виде различных типов графиков (включая научные, деловые, трёхмерные и двухмерные графики в различных системах координат, специализированные статистические графики — гистограммы, матричные, категорированные графики и др.), все компоненты графиков настраиваются.

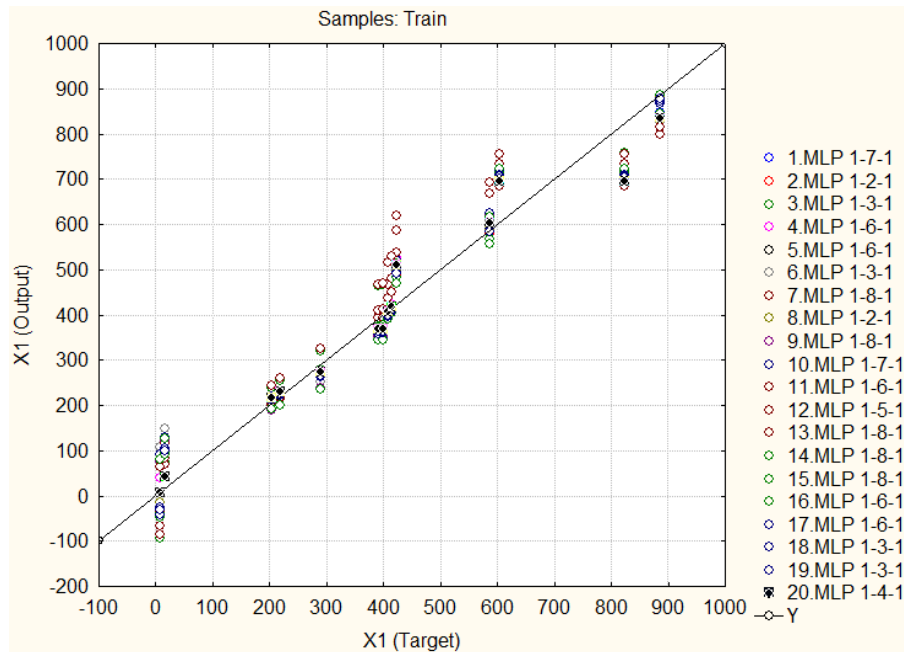


Рис. 2. Диаграмма рассеивания первой сети

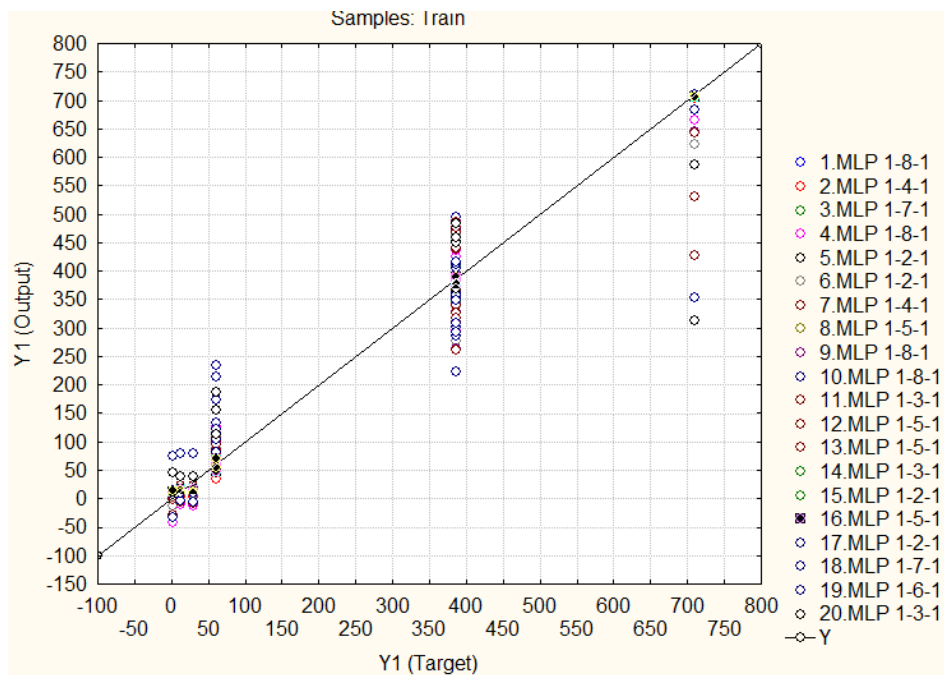


Рис.3. Диаграмма рассеивания второй сети

В результате моделирования искусственных нейронных сетей были получены диаграммы рассеивания (рисунки 2,3), которые показывают, насколько наши наблюдения примыкают к линии точности сети, а также была получена средняя относительная ошибка обучения сети, которая составляет 1%.

Влияние развития отдельных дефектов, характерных для элементов станочных механизмов, на параметры вибросигнала изучены достаточно хорошо. Однако сочетание этих дефектов в различных узлах может создавать сложную картину, которая не обязательно будет представлять сумму влияний каждого дефекта на параметры диагностического сигнала. Что говорит о том, что диагностика оборудования является задачей распознавания образов. При создании системы диагностирования все неисправности разбиваются на классы, им соответствие выделена области в пространстве технических параметров. Алгоритм, разработанный на базе элементов нечеткой логики, позволяет соотнести техническое состояние оборудования к подклассу возможных неисправностей с достоверностью в 95%.

Список литературы

1. Басманов М.С, Басманов А.С., Идрисова Ю.В., Фецак С.И., Вибродиагностика приводов металлообрабатывающих станков с применением искусственных нейронных сетей: статья / Молодежный вестник УГАТУ, УГАТУ – Уфа, 2012. – 198.
2. Боровиков В.П. Нейронные сети. *Statistica Neural Networks* | Горячая Линия – Телеком, 2008. – 392.
3. Идрисова Ю.В., Кудояров Р.Г., Фецак С.И. Диагностика приводов металлообрабатывающих станков с автоматическим управлением: учеб. пособие / УГАТУ – Уфа, 2013. – 153 с.
4. Боровиков В.П. *STATISTICA*. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2 – е издание. – Спб: Питер, 2003 – 688.

В.В. Чернышев, д.т.н., vad.chernyshev@mail.ru

В.В. Арыканцев, аспирант, arvstu@mail.ru

И.П. Вершинина, к.т.н., dtm@vstu.ru

Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, Россия

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ПРАВИЛ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СТРАТЕГИЮ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМ ШАГАЮЩИМ РОБОТОМ В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СРЕДЕ

Аннотация: Обсуждаются результаты исследований по разработке алгоритмов управления движением подводного шагающего робота с движителями циклового типа в условиях неполного и неоднозначного представления о текущей ситуации. Предложен ситуационный подход к организации поведения робота в недетерминированной подводной среде. Результаты работы могут быть востребованы при разработке подводных шагающих робототехнических систем для подводно-технических работ и новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

Ключевые слова: аппараты передвигающиеся по дну, мобильные роботы, механика шагающих роботов, динамика управляемого движения, нечеткая логика, математическое моделирование.

V.V. Chernyshev, sc.d., vad.chernyshev@mail.ru

V.V. Arykantsev, pg.st., arvstu@mail.ru

I.P. Vershinina, ph.d., dtm@vstu.ru

Volgograd State technical University, Russia, Volgograd

DEVELOPMENT OF THE BASE FOR RULES WHICH SPECIFIES A STRATEGY OF UNDERWATER WALKING ROBOT CONTROL IN NONDETERMINISTIC ENVIRONMENT

Abstract: Results of investigation of development of the underwater walking robot movement control algorithms in conditions of incomplete and ambiguous understanding about current situation. Offered the situational approach to the formation of robot's behavior in nondeterministic environment. Results of the work can be interesting in development of underwater walking robotic systems for underwater technical works and new reclamation of sea bottom industrial technologies.

Keywords: bottom devices, mobile robots, walking robot mechanics, controlled movement dynamics, fuzzy logic, mathematical modelling.

Существующие машины передвигающиеся по дну (подводные бульдозеры, самоходные донные добычные агрегаты, кабелеукладчики и др.) имеют, как правило, гусеничный движитель [1, 2]. Однако условия морского или речного дна, характеризующиеся сложным рельефом и низкой несущей способностью грунтов, зачастую делают непригодными традиционные типы движителей. Шагающие машины представляются более подходящими для донных работ. Испытания шагающего робота «Восьминог» в условиях заболоченных водоемов [3] и подводные испытания шагающего аппарата МАК-1 (рис. 1) [4], показали, что в сравнении с гусеничными и колесными машинами, шагающие машины обладают более высокими возможностями по грунтовой и профильной проходимости [5, 6]. Также имеет место снижение затрат тягового усилия на сопротивление движению [7].

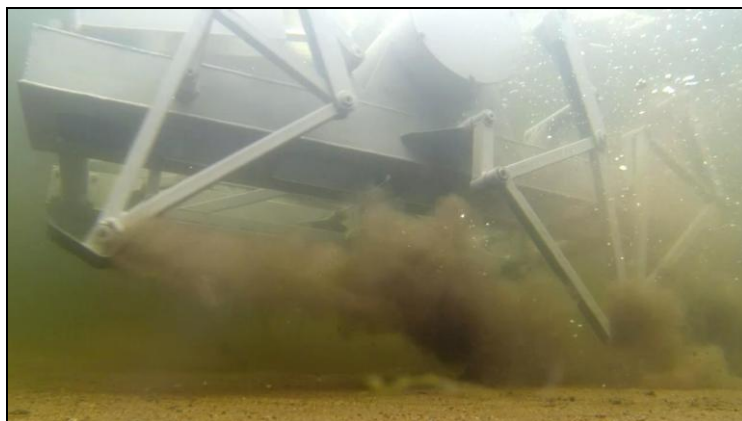


Рис. 1. Испытания подводного шагающего аппарата МАК-1

Вместе с тем подводные испытания аппарата МАК-1 выявили ряд проблем связанных с управлением аппарата. При управлении движением использовался следующий подход. Оператор находился вне рабочего пространства и контролировал работу автономно работающей машины по визуальной информации поступающей по кабелю с бортовых видеосенсоров. При этом не ставилась задача выделения алгоритмами обработки изображений полезной информации в сигналах бортовых видеокамер с целью определения характеристик рабочего пространства. В маршевых режимах движения оператор вмешивался в управление движением лишь при необходимости (оператор может менять величину курсовой скорости, направление движения, а также имеет определенные возможности по корректировке параметров шага). При специальном маневрировании, например, при преодолении локальных препятствий, управление в основном осуществлялось оператором в ручном режиме. Однако, как показали подводные испытания, видимость под водой существенно ограничена — не

более 1–3 м. Поэтому в маршевых режимах движения (при скоростях до 1,5 м/с) оператор, как правило, не успевал принимать адекватных решений в случае появления какого-либо препятствия по ходу движения. В результате при встрече с препятствиями, из-за ускоренного движения опорных точек движителя в фазе переноса, имели место случаи разрушения стоп. Указанный недостаток предполагается устранить за счет дополнительного демпфирующего устройства, обеспечивающего диссипативную связь стопы с опорным звеном механизма шагания [8].

В движителе МАК-1 применен цикловой механизм шагания (рис. 2 а) с трансформируемой траекторией опорной точки [9] и системой пассивного управления стопой [10, 11]. Последняя обеспечивает подъем носка шарнирно закрепленной стопы при переносе. На участке AB траектории (рис. 2 б) стопа находится в фазе опоры на грунт (точки с заливкой соответствуют опорной фазе). В конце опорной фазы — участок BC траектории, стопа 4 расположена под углом α_1 к опорному звену 2. В фазе переноса — участок CD траектории, угол α_1 не изменяется и носок стопы при переносе будет приподнят. Если стопа лыжеобразной формы, то в начале фазы переноса — в точке C траектории, возможен контакт пятки стопы D'' с грунтом. В этом случае угол α_1 уменьшится до α_2 , но и при этом носок стопы в фазе переноса будет приподнят, хотя и в меньшей степени. После переноса, стопа — на участке DA траектории, опускается на грунт. Угол α_2 уменьшается до α_3 , а угол φ_4 становится равным π . Подъем носка стопы осуществляется и при реверсивном движении (задним ходом) (рис. 2 в). В этом случае носок D' и пятка D'' стопы меняются местами. Введение в механизм шагания дополнительного демпфера, помимо снижения интенсивности ударных процессов в движителе при встрече с препятствием и при смене стоп, также уменьшит влияние случайных факторов на их программное движение.

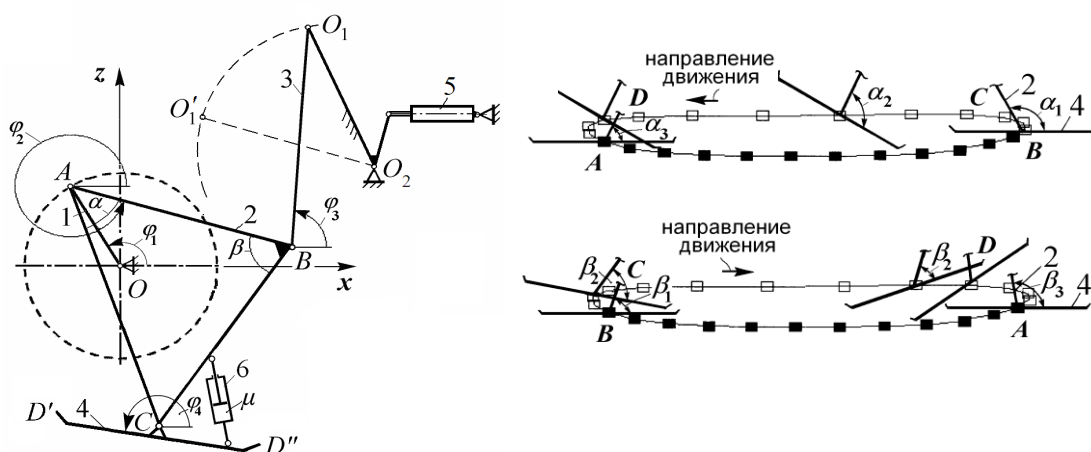


Рис. 2. Схема механизма шагания подводного робота МАК-1 (а) и траектория его опорной точки с характерными положениями стопы при прямом (б) и реверсивном (в) движении:

1 — кривошип; 2 — опорное звено; 3 — коромысло; 4 — стопа; 5 — линейный электропривод смещения точки подвеса коромысла; 6 — демпфер

Движение стопы в течение цикла определяется величиной и направлением абсолютных скоростей опорных точек C и угловыми скоростями опорных звеньев. Угловые скорости стоп движителя с 2-мя работающими в противофазе 4-х звенными механизмами шагания определяются выражениями

$$\omega_{41} = \begin{cases} (1-U_1)\omega_{21} \text{ при } \begin{cases} z_{D'1} > z_{C2} \text{ и } z_{D''1} > z_{C2} \\ \text{или} \\ z_{D'1} = z_{C2} \text{ и } v_{C1z} + \omega_{21}l_4 \cos \varphi_{41} > 0 \\ \text{или} \\ z_{D''1} = z_{C2} \text{ и } v_{C1z} - \omega_{21}l_4 \cos \varphi_{41} > 0, \end{cases} \\ (1-U_1)\frac{v_{C1z}}{l_4 \cos \varphi_{41}} \text{ при } \begin{cases} z_{D'1} = z_{C2} \text{ и } v_{C1z} + \omega_{21}l_4 \cos \varphi_{41} \leq 0 \\ \text{или} \\ z_{D''1} = z_{C2} \text{ и } v_{C1z} - \omega_{21}l_4 \cos \varphi_{41} \leq 0, \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega_{42} = \begin{cases} (1-U_2)\omega_{22} \text{ при } \begin{cases} z_{D'2} > z_{C1} \text{ и } z_{D''2} > z_{C1} \\ \text{или} \\ z_{D'2} = z_{C1} \text{ и } v_{C2z} + \omega_{22}l_4 \cos \varphi_{42} > 0 \\ \text{или} \\ z_{D''2} = z_{C1} \text{ и } v_{C2z} - \omega_{22}l_4 \cos \varphi_{42} > 0, \end{cases} \\ (1-U_2)\frac{v_{C2z}}{l_4 \cos \varphi_{42}} \text{ при } \begin{cases} z_{D'2} = z_{C1} \text{ и } v_{C2z} + \omega_{22}l_4 \cos \varphi_{42} \leq 0 \\ \text{или} \\ z_{D''2} = z_{C1} \text{ и } v_{C2z} - \omega_{22}l_4 \cos \varphi_{42} \leq 0, \end{cases} \end{cases}$$

где U_k — единичная функция описывающая состояние k -го механизма шагания движителя ($k = 1, 2$), принимающая лишь два значения: 1 при опоре ноги на грунт и 0 при переносе ноги; ω_{2k} — угловая скорость опорного звена; φ_{4k} и ω_{4k} — угол поворота и угловая скорость стопы, соответственно; l_4 — половина длины стопы; v_{Ckz} — вертикальные составляющие абсолютной скорости опорных точек; $z_{D'k} = z_{Ck} + l_4 \sin \varphi_{4k}$ и $z_{D''k} = z_{Ck} + l_4 \sin(\varphi_{4k} + \pi)$ — координаты носка и пятки k -той стопы в системе отсчета связанной с корпусом аппарата.

Пассивная адаптация стопы позволяет преодолевать препятствия высотой в 2 раза более высоты шага. Профильная проходимость зависит от начального положения ног на профиле. Поэтому, успешное преодоление препятствия во многом зависит от алгоритма поведения машины при его прохождении. Для этого необходимо построение модели рассматриваемого процесса. Однако в нашем случае построение корректной модели

представляется трудноосуществимым из-за многообразия возможных ситуаций.

В нашем случае более подходит принцип ситуационного управления [12], в соответствии с которым каждому классу ситуаций, возникновение которых возможно в процессе движения, ставится в соответствие некоторое решение по управлению. Путем комбинирования различных условий, входящих в выражения (1) и введя ряд лингвистических переменных (препятствие высокое, низкое, глубокое, широкое и др.), были сформулированы правила поведения робота в форме нечетких условных суждений типа «Если $A \dots$, то $B \dots$ ». Например, для ситуации представленной на рис. 3 а, «если $U_1 = 0$ и $U_2 = 0$ (1-я стопа в переносе, 2-я в фазе опоры) и $z_{D'1} > z_{C2}$, $z_{D''1} > z_{C2}$ (носок и пятка 1-ой стопы выше опорной точки 2-ой стопы) и $\omega_{41}^r > 0$ (имеется положительная относительная угловая скорость 1-ой стопы, по отношению к опорному звену той же ноги), то препятствие высокое (непреодолимое в маршевом режиме)». В этом случае необходима экстренная остановка аппарата и передача управления оператору. Если при тех же условиях $\omega_{41}^r < 0$, рис. 3 б, то препятствие «низкое» и движение может быть продолжено в маршевом режиме.

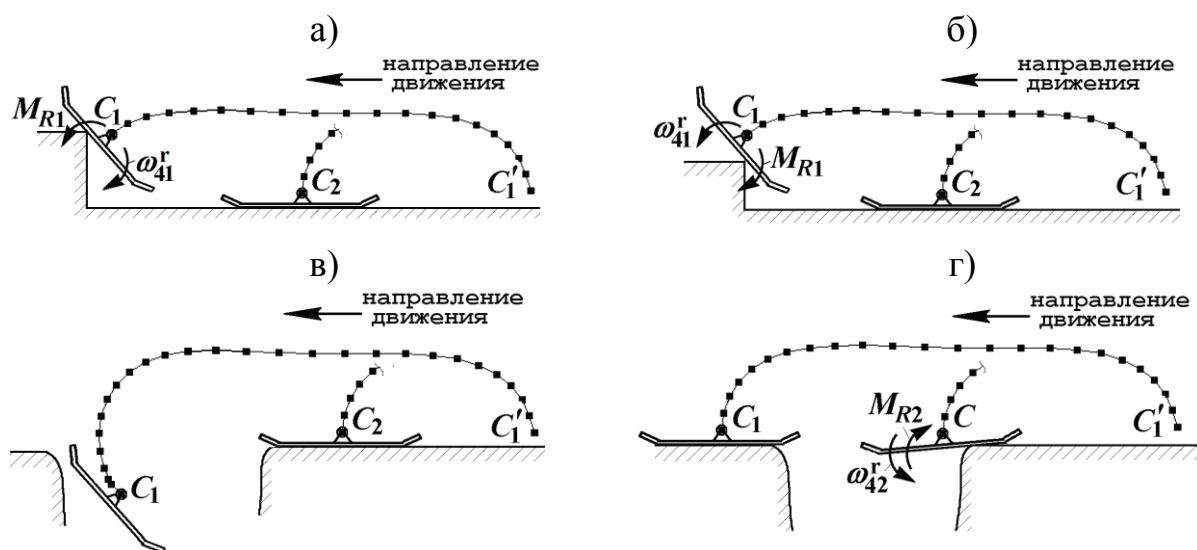


Рис. 3. Различные ситуации при встрече с препятствием

Возможны различные ситуации при преодолении одного и того же препятствия. На рис. 3 в, г, например, показаны возможные ситуации для «глубокого», «неширокого» препятствия. В первом случае пятка 1-ой стопы не достала дна. Во втором случае при первом шаге препятствие не было замечено, но было преодолено. Далее в обоих случаях необходима экстренная остановка аппарата, его реверсивное движение и повторная попытка преодоления препятствия с корректировкой длины шага. Интерактивный анализ поведения системы управления аппарата при помощи

программной модели объекта управления показал, что в подобных типовых ситуациях управление движением может быть осуществлено без вмешательства оператора.

Таким образом, предложенный ситуационный подход к организации поведения подводных шагающих роботов с движителями циклового типа позволяет облегчить процесс управления движением в условиях неполного и неоднозначного представления о текущей ситуации, обусловленных подводной средой. Результаты работы могут быть востребованы при разработке подводных шагающих робототехнических систем для подводно-технических работ и новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-08-01109-а, 15-41-02451 р_поволжье-а, 16-31-00427-мол_а.

Список литературы

1. Чернышев В.В., Арыканцев В.В., Гаврилов А.Е. Управление движением подводных шагающих аппаратов передвигающихся по дну // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1. С. 141-155.
2. Verichev S., Jonge L., Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. / VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014. P. 126-138.
3. Чернышев В.В. Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – №5. – С. 28-30.
4. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. МАК-1 — подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2. – С. 45-50.
5. Чернышев В.В., Арыканцев В.В., Гаврилов А.Е., Калинин Я.В. Исследования динамики взаимодействия движителя подводного шагающего аппарата с донным грунтом // Исследования наукограда. – 2015. – № 1. – С. 32-36.
6. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Gavrilov A.E. etc. Design and underwater tests of sub-sea walking hexapod MAK-1 // Proc. of the ASME 2016 35th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2016, Busan, 2016. – 9 p.
7. Chernyshev V.V., Gavrilov A.E. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability//Minerals of the Ocean–7 & Deep-Sea Minerals and Mining–4: abs. of Int. Conf./ St. Petersburg, 2014. P. 21-24.
8. Пат. 2191131 РФ, B62 D57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости: / В.В. Чернышев; ВолгГТУ. 2002.
9. Пат. 2207583 РФ B62 D57/032. Шагающая опора транспортных средств повышенной проходимости / В.В. Чернышев, Е.С. Брискин, А.Ю. Савин; 2003.
10. Брискин Е.С., Чернышев В.В. Цикловые механизмы шагания с пассивно управляемой стопой // Теория механизмов и машин. – 2004. – №1. – С.80-88.
11. Пат. 2156711 РФ, B62 D57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Д.Е. Охоцимский, Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, С.В. Шерстобитов; ВолгГТУ. 2000.
12. Юценко А.С., Киселев Д.В. Ситуационный подход к организации поведения мобильного робота в условиях неопределенности // Мехатроника. – 2000. – № 5. – С. 10-15.

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЛАДКИХ ТРАЕКТОРИЙ, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ СПЛАЙНОВ БЕЗЬЕ

Аннотация: В работе решается задача формирования гладких траекторий движения мехатронного объекта построенных на основе сплайнов Безье и имеющих минимальную кривизну, что позволяет увеличить точность и скорость движения этих объектов. Для решения этой задачи предлагается использовать нейронную сеть, обученную аппроксимировать функцию выбора оптимальных параметров сплайна. Преимущество предложенного подхода заключается в его небольшой вычислительной сложности и требуемого объема памяти, что позволяет реализовать его в реальном масштабе времени на бортовом компьютере мехатронного объекта.

Ключевые слова: робототехника, формирование траекторий, оптимизация, нейронная сеть

THE NEURON NET FOR FORMATION OF OPTIMAL SMOOTH TRAJECTORIES BASED ON BEZIER SPLINES

D.A. Yukhimets, Doctor of Science, undim@iacp.dvo.ru
Institute of automation and control processes, Russia

Abstract: In this paper the task of formation of smooth trajectory of mechatronics objects movement is discussed. These trajectories is based on Bezier splines and must have minimal curvature that allows to increase the accuracy and speed of movement of these objects. For solving of this task it is proposed to use the neural net which is trained as approximation of function of optimal selection of Bezier splines. The advantages of this approach is small computation complexity and required memory volume that allow to implement of this approach in real time on onboard computer of mechatronic object.

Key words: robotics, trajectory forming, optimisation, neuron net

В настоящее время в процессе автоматизированного производства в неизвестном заранее окружении возникает задача организации движения

различных мехатронных объектов (МО), например, промышленных манипуляторов, автоматических транспортных систем, в заранее неизвестном окружении на основе данных, получаемых от их датчиков. Для решения этой используют следующие общепринятые подходы.

Первый подход состоит в формировании траектории движения как прохода по последовательности базовых точек [1, 2]. Преимуществом такого подхода является простота задания движения МО, а недостатком является то, что в этом случае невозможно точно спрогнозировать траекторию, по которой будут происходить реальное движение. Другой подход заключается в формировании траекторий в виде последовательности прямолинейных участков, соединяющих заданную последовательность базовых точек [3, 4]. Однако наличие изломов траектории приводит к неравномерности движения МО и возникновению скачков ускорения, что может негативно сказываться на качестве выполнения операций. Третий способ заключается в формировании гладких траекторий движения МО [5, 6], которые позволяют обеспечить их движение с относительно большими скоростями без скачков ускорений. При этом наиболее удобным способом является использование сплайнов Безье третьего порядка, которые позволяют унифицировано формировать гладкие траектории и программные сигналы движения на основе любой последовательности базовых точек [7].

Основным фактором, негативно влияющим на точность и скорость движения МО, является кривизна траектории [8]. Поэтому траектории движения, формируемые на основе сплайнов, должны иметь как можно меньшую кривизну. В настоящее время для построения таких траекторий используются методы численной оптимизации, основанные на методе градиентного спуска [9]. Однако в случае, когда траектория формируется в процессе движения мехатронного объекта (промышленного манипулятора, мобильного робота автоматизированной транспортной системы) использование этих методов затруднено из-за их высокой вычислительной сложности.

Таким образом, возникает задача разработки метода формирования гладких траекторий, имеющих минимальную кривизну и обеспечивающих максимально высокую скорость движения мехатронного объекта, который обладал бы небольшой вычислительной сложностью.

Постановка задачи. Пусть участок траектории движения МО, задается с помощью сплайна Безье третьего порядка [10], который описывается в параметрическом виде с помощью выражений:

$$X^*(\tau) = (1-\tau)^3 W_1 + 3(1-\tau)^2 \tau \hat{W}_1 + (1-\tau) \tau^2 \hat{W}_2 + \tau^3 W_2, \quad (1)$$

где $W_i = [W_{xi}, W_{yi}]^T$ - координаты базовых точек сплайна;
 $\hat{W}_i = [\hat{W}_{xi}, \hat{W}_{yi}]^T, i = \overline{1,2}$ - координаты управляющих точек сплайна;

$X^* = [x, y]^T$ - вектор координат целевой точки, движущейся вдоль сплайна; $\tau \in [0, 1]$ – переменная, задающая движение целевой точки X^* по сплайну.

Будем полагать, что положение точек $\hat{W}_1$ и $\hat{W}_2$ определяется с помощью выражений:

$$\hat{W}_1 = W_1 + k_{p1} \mathbf{k}_{c1}, \hat{W}_2 = W_2 - k_{p2} \mathbf{k}_{c2}, \quad (2)$$

где $\mathbf{k}_{ci} = [k_{cxi}, k_{cyi}, k_{czi}]^T$, $\|\mathbf{k}_{ci}\| = 1$, $i = \overline{1, 2}$ - вектор направляющих коэффициентов, которые задают направление движения МО в начальной и конечной точке сплайна; k_{p1}, k_{p2} - расстояние между соответствующими базовой и управляющей точками сплайна. В процессе планирования траекторий движения МО базовые точки W_i , $i = \overline{1, 2}$ траектории и вектора $\mathbf{k}_{ci}$ определяются заданием или данными, получаемыми от датчиков окружающей среды. При этом в процессе формирования траекторий ее кривизна может регулироваться величинами k_{p1} и k_{p2} .

Для решения задачи формирования траектории с минимальной кривизной целесообразно заранее просчитать оптимальные решения для некоторого количества вариантов параметров W_1 , W_2 и $\mathbf{k}_{cj}$, $j = \overline{1, 2}$, после чего использовать полученные решения для обучения нейронной сети, обеспечивающей аппроксимацию функции оптимального выбора параметров k_{p1} и k_{p2} для любого набора исходных параметров. Далее решим задачу создания такой нейронной сети.

Формирование обучающей выборки для нейронной сети. Основной задачей при обучении нейронной сети является задача формирования обучающей выборки. Для упрощения задачи формирования обучающей выборки и уменьшения ее размерности будем рассматривать сплайн, проходящий через точки с координатами $\tilde{W}_1 = (0, 0)$ и $\tilde{W}_2 = (\tilde{W}_{x2}, 0)$. Следует отметить, что любой сплайн вида (1), (2) можно привести к сплайну, проходящему через указанные точки, с помощью следующего преобразования координат:

$$\tilde{W}_2 = \begin{bmatrix} \frac{W_{x2} - W_{x1}}{\|W_2 - W_1\|} & \frac{W_{y2} - W_{y1}}{\|W_2 - W_1\|} \\ \frac{W_{y1} - W_{y2}}{\|W_2 - W_1\|} & \frac{W_{x2} - W_{x1}}{\|W_2 - W_1\|} \end{bmatrix} (W_2 - W_1), \tilde{\mathbf{k}}_{ci} = \begin{bmatrix} \frac{W_{x2} - W_{x1}}{\|W_2 - W_1\|} & \frac{W_{y2} - W_{y1}}{\|W_2 - W_1\|} \\ \frac{W_{y1} - W_{y2}}{\|W_2 - W_1\|} & \frac{W_{x2} - W_{x1}}{\|W_2 - W_1\|} \end{bmatrix} \mathbf{k}_{ci}, i = \overline{1, 2}. \quad (3)$$

При этом если величины k_{p1} и k_{p2} представить в виде $k_{p1} = \tilde{W}_{x2} \tilde{k}_{p1}$, $k_{p2} = \tilde{W}_{x2} \tilde{k}_{p2}$, то выражения (1) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} x(\tau) &= \tilde{W}_{x2} (3(1 - \tau)^2 \tilde{k}_{p1} k_{cx1} + 3(1 - \tau) \tau^2 (1 - \tilde{k}_{p2} k_{cx2}) + \tau^3), \\ y(\tau) &= \tilde{W}_{x2} (3(1 - \tau)^2 \tilde{k}_{p1} k_{cy1} - 3(1 - \tau) \tau^2 \tilde{k}_{p2} k_{cy2}). \end{aligned} \quad (4)$$

Из выражений (4) видно, что при заданных векторах $\tilde{\mathbf{k}}_{ci}, i = \overline{1,2}$ оптимальные значения величин $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$ не зависят от $\tilde{W}_{x2}$, то есть при предложенном описании координаты начальной и конечной точки сплайна можно исключить из входных данных обучающей выборки. При этом, в качестве входных данных вместо векторов $\tilde{\mathbf{k}}_{ci}, i = \overline{1,2}$ будут использоваться углы ψ_1, ψ_2 , задающие наклон касательной сплайна в базовых точках сплайна.

В процессе формирования обучающей выборки рассчитывались оптимальные значения параметров $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$ для каждой комбинации углов ψ_1, ψ_2 , значения которых менялись в пределах от $-\pi/2$ до $\pi/2$ с шагом 0.05 рад. Для каждой комбинации этих углов рассчитывалась максимальная величина $C_{\max}$ модуля кривизны сплайна при различных комбинациях параметров $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$, которые менялись в диапазоне от 0.2 до 1.0 с шагом 0.05. После расчета значений $C_{\max}$ для всех возможных комбинаций $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$ выбиралась такая комбинация, которая обеспечивает минимальное значение $C_{\max}$. Эта комбинация сохранялась в обучающей выборке как оптимальное значение параметров $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$.

Таким образом, была сформирована обучающая выборка $S(\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}, \psi_1, \psi_2)$, входными значениями для которой являются комбинации углов ψ_1, ψ_2 , а выходными значениями оптимальные параметры $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$, минимизирующие кривизну сплайна. Графический вид полученной выборки для параметра $\tilde{k}_{p1}$ представлен на рис.

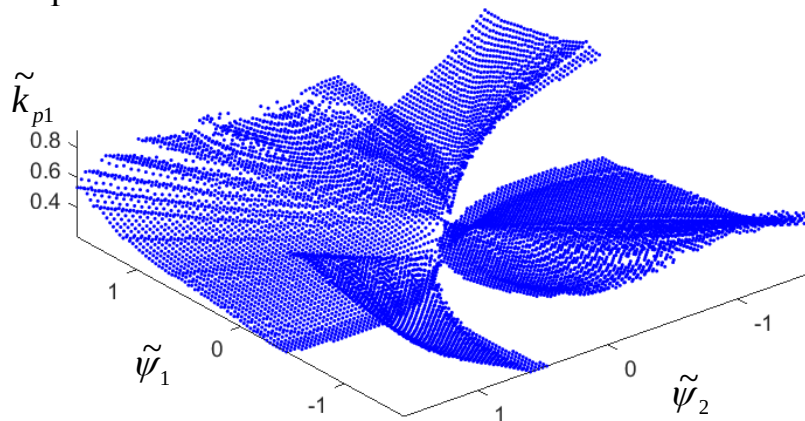


Рис. Обучающая выборка для параметра $\tilde{k}_{p1}$

Как видно из представленного рисунка функция, которая описывает зависимость параметров $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$, имеет разрывы, разбивающие все выборку на две части, что не позволяет обеспечить точную аппроксимацию функции

оптимального выбора указанных параметров с помощью нейронной сети. Для решения этой проблемы из всей обучающей выборки следует выделить участки, не содержащие разрывов, и для каждого участка синтезировать свою нейронную сеть, которые можно использовать в зависимости от комбинации входных величин.

Анализ данных в сформированной выборке показал, что линии разрыва можно с высокой точностью аппроксимировать с помощью следующих функций:

$$C_1(\tilde{\psi}_1, \tilde{\psi}_2) = -\tilde{\psi}_2 + 0.2771\tilde{\psi}_1^3 + 0.00374\tilde{\psi}_1^2 + 0.007866\tilde{\psi}_1, \quad (5)$$

$$C_2(\tilde{\psi}_1, \tilde{\psi}_2) = -\tilde{\psi}_2 - (0.2771\tilde{\psi}_1^3 + 0.00374\tilde{\psi}_1^2 + 0.007866\tilde{\psi}_1),$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\psi}_1 \\ \tilde{\psi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\pi/4) & \sin(\pi/4) \\ -\sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

С помощью выражений (6) полная обучающая выборка S разбивается на две части S_1 и S_2 с помощью выражений:

$$S_1(j) = S(i), \text{ если } C_1(\tilde{\psi}_1, \tilde{\psi}_2)C_2(\tilde{\psi}_1, \tilde{\psi}_2) > 0, \quad (7)$$

$$S_2(k) = S(i), \text{ если } C_1(\tilde{\psi}_1, \tilde{\psi}_2)C_2(\tilde{\psi}_1, \tilde{\psi}_2) < 0, \quad i = \overline{1, N}, \quad j + k = N.$$

Полученные выборки используются для обучения двух нейронных сетей, аппроксимирующих функцию оптимального выбора параметров $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$.

Нейронная сеть для расчета оптимальных параметров сплайна и алгоритм ее применения. Так как функция зависимости параметров сплайна $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$ от величин углов ψ_1, ψ_2 не зависит от времени, то для ее аппроксимации используется нейронная сеть прямого распространения с 15 нейронами в скрытом слое. Как показали исследования, увеличение количества нейронов в скрытом слое в два раза приведет к уменьшению ошибки обучения сети не более чем на 5%.

Алгоритм расчета оптимальных параметров сплайна с использованием полученных нейронных сетей состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Нормализация параметров сплайна. На этом шаге координаты начальной и конечной точки сплайна преобразуются с помощью выражений (3).

Шаг 2. С помощью выражений (5) и (6) рассчитываются значения переменных C_1 и C_2 .

Шаг 3. Выбирается нейронная сеть, которая будет формировать оптимальные параметров сплайна. Условием выбора является следующее: если $C_1C_2 > 0$, то для расчета $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$ используется нейронная сеть, обученная на выборке S_1 , а если $C_1C_2 < 0$, то нейронная сеть, обученная на выборке S_2 .

Шаг 4. Полученные значения параметров $\tilde{k}_{p1}, \tilde{k}_{p2}$ умножаются на значение $\tilde{W}_{x2}$ и используются для формирования траектории.

Исследование предложенного алгоритма показало, что он позволяет обеспечить формирование параметров сплайна отличающихся от оптимальных не более чем на 3%. Это отклонение приводит к возрастанию максимальной кривизны сплайна не более чем на 0.014 рад/м по сравнению с оптимальным значением, что не является существенным для управления МО. При этом он обладает малой вычислительной сложностью и не требует большого объема памяти для его реализации.

Таким образом, синтезированные нейронные сети позволяют формировать параметры сплайнов, обеспечивающие их минимальную кривизну. При этом сам алгоритм имеет небольшую вычислительную сложность за счет использования нейронных сетей небольшой размерности и может быть использован в реальном времени на большинстве вычислительных систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 15-58-45067.

Список литературы

1. Siciliano B., Khatib O. Handbooks of robotics. Springer, 2008, 1628p.
2. Fu K., Gonzalez R., Lee C. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence, Mcgraw-Hill Book Company, 1987. -580 p.
3. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, - WileY&Sons Ltd., 2011. – 575 p.
4. Автономные подводные роботы. Под ред. М.Д. Агеева. – М: Наука, 2005. – 398 с.
5. Lebedev A.V. The formation of dynamic objects trajectories in conditions of control signals saturation // In Proceedings of the 18th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. – 2014. - Vol. 1, 154-159. International Institute of Informatics and Systemics, Orlando, USA.
6. Munoz V., Ollero A. Smooth trajectory planning method for mobile robots // Special issue on Intelligent Autonomous Vehicles of the Journal of Integrated Computed-Aided Engineering. – 1999. – Vol. 6. – No. 4. – P. 1-6.
7. Yang K., Jung D., Sukkarieh S. Continuous curvature path-smoothing algorithm using cubic Bézier spiral curves for non-holonomic robots // Advanced Robotics. – 2013. – Vol. 27. – No. 4. – P. 247-258.
8. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed // Proc. of Int. conf. on Computer, Control, Informatics and its Applications, Jacarta, Indonesia, 2016. – pp. 93-96.
9. Ikonen E., Najim K. Advances process identification and control. – Marcel Dekker Inc., 2002. – 316 p.
10. C. De Boor. A practical guide to splines, Springer, 2001.

Секция 4

АЛГОРИТМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И БАЗЫ ЗНАНИЙ

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ ОБЪЕКТА НА РАЗМЫТЫХ СНИМКАХ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ

Аннотация: В статье описан вычислительный эксперимент, в котором для измерения площади объекта «Озеро» используется классический генетический алгоритм. В роли начальных данных выбраны размытые снимки, содержащие объекты интереса. Вычислительный эксперимент состоит из двух этапов. На первом этапе приводятся обобщенные формулы величин, необходимые для выбора начальных изображений, с использованием теории модифицированных дескриптивных алгебр изображений. Далее, с учетом вычисленных значений величин происходит формирование начальных данных, т.е. выбор размытого снимка в нужном масштабе и угле съемки. На второй стадии разрабатывается модель системы технического зрения (системы компьютерного зрения) в модифицированных дескриптивных алгебрах изображений и функция пригодности для генетического алгоритма. Далее выбираются варьируемые параметры модели и проводится их оптимизация в среде MATLAB. В статье демонстрируется развитие модели за счет ее усложнения дополнительными методами обработки изображений. Экспериментально было установлено, что эволюция модели улучшает результаты оптимизации.

Ключевые слова: вычислительный эксперимент в Matlab, измерение площади объекта; целевая функция; генетический алгоритм; модифицированная дескриптивная алгебра изображений; комбинаторная оценка пространства; пространство состояний изображения.

CALCULATION OF OBJECTS AREA ON BLYRRY IMAGES BY GENETIC ALGORITHM

A.R. Iskhakov, lecturer, intellab@mail.ru,
R.F. Malikov, professor, rfmalikov@mail.ru
BSPU named after M. Akmully, Ufa, Russia

Abstract: Classical genetic algorithm is used in a computational experiment, which is described in this article, to measure an area of the object «Озеро». Blurry images containing objects of interest are selected as initial data. The computational experiment consists of two steps. The first step presents the generalized formulas of values. These for-

mulas are needed to select initial images, using the theory of modified descriptive algebra of images. After that, the initial data is formed according to the calculated values, i.e. the blurry image is chosen in the needed scale and the shooting angle. At the second step, a model of technical vision system (computer vision system) in the modified descriptive images algebra and fitness function for the genetic algorithm are developed. Then varying parameters of the model are chosen and their optimization is carried out in MATLAB. The article demonstrates development of the model due to its complexity by additional imaging techniques. Experimentally it was found that the evolution of the model improves optimization results.

Keywords: measurement of an object area, objective function, genetic algorithm, modified descriptive images algebra, combinatorial evaluation of a space, space of image states

Введение

Задачи дистанционной идентификации объектов техногенного происхождения, распознавания, измерения их характеристик и признаков остаются до сих пор актуальными [1, 2]. В статье предлагается подход к разработке и оптимизации методов обработки и анализа изображений оптического диапазона, предшествующих этапу распознавания. Этот подход в описании обработки и анализа изображений опирается на математические аппараты цифровой обработки и анализа изображений, а также на методологию модифицированных дескриптивных алгебр изображений (МДАИ) [3]. Оптимизация разрабатываемого метода проводится классическими генетическими алгоритмами (ГА) [4]. Функция приспособленности (аналог целевой функции) представляет собой метод анализа изображений, содержащий в себе разрабатываемый метод их обработки. Начальные данные представлены размытыми снимками в оптическом диапазоне (Google Maps, Яндекс Карты) (Рис. 1) [5].

Оценка параметров вычислительного эксперимента

На рисунке 1 (справа) изображен объект с выделенными экспертом границами, которая вполне определяет площадь объекта интереса для его распознавания.

В работах [6, 7] описывается методика проведения вычислительного эксперимента. Для изображения объекта на рисунке 2 имеем высоту $n=99$ пикселей, ширину $m=99$ пикселей и разрешение $d_{pct}=96$ пиксель на дюйм длины. Следовательно, высота $n=1,03125$ см, ширина $m=1,03125$ см, разрешение $d_{pct}=37,795$ пиксель на сантиметр длины [3, 6, 7]. Вычислим число пикселей δ для точности ε по формуле (1) [3, 6, 7].



Рис. 1. Изображение объекта (левый) и его границы (правый)

$$\delta = \left\lceil \frac{\varepsilon}{d_{pcm}} \right\rceil \quad (1)$$

Площадь объекта «Озеро» для вида сверху примерно составляет $S \approx 328,702 \text{ м}^2$. Пусть измерение реальной площади объекта производится с точностью $\varepsilon = 50 \text{ м}^2$, что составляет 15% от полной площади S . На заданной высоте размытой съемки 1 пиксель покрывает $s_e = \frac{S}{p} = \frac{328,702}{2071} \approx 0,159 \text{ м}^2$ площади. Далее используя простую пропорцию между величинами можно вычислить количество пикселей в 15% погрешности $\delta = \left\lceil \frac{2070 \cdot 15}{100} \right\rceil = \left\lceil \frac{31050}{100} \right\rceil = 310,5 \approx 311$ пикселям [3, 6, 7]. Определим p пикселей, значимых в планируемом достоверном измерении по формуле (2) [3, 6, 7].

$$S_{pix} = p = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij}, \quad I_{bin}^* = \|z_{ij}\|, \quad z_{ij} \in S_{bin} \quad (2)$$

Для объекта (рис. 1, справа) были подсчитаны пиксели ее площади, ограниченные границей красного цвета. Граница определена экспертом и $p = 2070$ пикселям. Для достоверного измерения площади допустимы будут изображения ровно с $l = (1759; 2381)$ значимыми пикселями. Далее, значения величин $\delta = 311$ и $p = 2070$ подставляем в (3) и вычисляем координаты вектора $\vec{k}_{bin}$ [3, 6, 7].

$$\vec{k}_{bin} = (C_{nm}^{p-\delta}, \dots, C_{nm}^{p+\delta}) = (C_{7254}^{1759}, \dots, C_{7254}^{2381}) \quad (3)$$

Каждая из координат этого вектора представляет количество изображений $I_{bin}^* = \|z_{ij}\|$, $z_{ij} \in S_{bin}$ в группах для p значимых пикселей. Сумма координат вектора $\vec{k}_{bin}$ согласно (4) будет оценкой сечения воронки K_{bin} в МДАИ A_{bin} [3, 6, 7].

$$K_{bin} = \sum_{l=1759}^{2381} C_{7254}^l = .3423393567 \cdot 10^{1993} \quad (4)$$

Пусть $\|z_{ij}\| = O_T^{gray \rightarrow bin}(\|y_{ij}\|, \theta)$ есть операция конвертирования полутоновых изображений $I_{gray} = \|y_{ij}\|$, $y_{ij} \in S_{gray}$ в бинарные изображения $I_{bin} = \|z_{ij}\|$, $z_{ij} \in S_{bin}$, где $z_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } y_{ij} < \theta \\ 1, & \text{если } y_{ij} \geq \theta \end{cases}$ и θ - порог конвертирования [3]. Реальное значение $\theta = 64$ было подобрано экспертом исходя из максимального вписывания площади объекта интереса в указанные ранее границы после конвертирования в бинарное изображение. Для $l = (p - \delta), (p + \delta)$ значимых точек в изображении $I_{bin}^* = \|z_{ij}\|$, $z_{ij} \in S_{bin}$ при пороге конвертирования $\theta = 64$ его прообразов будет ровно $\theta^{nm-(p-\delta)} \cdot (256 - \theta)^{(p-\delta)}, \dots, \theta^{nm-(p+\delta)} \cdot (256 - \theta)^{(p+\delta)}$ единиц соответственно. Представим их в виде координат вектора $\overrightarrow{\theta_{gray}}$ (5) [3, 6, 7].

$$\overrightarrow{\theta_{gray}} = (\theta_{p-\delta}^{gray}, \dots, \theta_{p+\delta}^{gray}) = (\theta^{nm-(p-\delta)} \cdot (256 - \theta)^{(p-\delta)}, \dots, \theta^{nm-(p+\delta)} \cdot (256 - \theta)^{(p+\delta)}) \quad (5)$$

Подставив в (5) значения величин $n = 99$, $m = 99$, $\delta = 311$, $p = 2070$ и $\theta = 64$ (определено экспертом) вычисляем координаты вектора $\overrightarrow{\theta_{gray}}$ для решаемой задачи.

$$\overrightarrow{\theta_{gray}} = (64^{1759} \cdot 192^{5495}, \dots, 64^{2381} \cdot 192^{4873})$$

Таким образом, размер сечения воронки K_{gray} рассчитывается как скалярное произведение векторов $\overrightarrow{k_{bin}}$ и $\overrightarrow{\theta_{gray}}$ согласно (6) [3, 6, 7].

$$K_{gray} = \overrightarrow{k_{bin}} \cdot \overrightarrow{\theta_{gray}} = \sum_{l=p-\delta}^{p+\delta} k_l^{bin} \cdot \theta_l^{gray} = \sum_{l=p-\delta}^{p+\delta} C_{nm}^l \cdot \theta^{nm-l} \cdot (256 - \theta)^l \quad (6)$$

Для решаемой задачи величина

$$K_{gray} = \sum_{l=1759}^{2381} k_l^{bin} \cdot \theta_l^{gray} = \sum_{l=1759}^{2381} C_{7254}^l \cdot 64^l \cdot 192^{7254-l} = .2190920805 \cdot 10^{17470}$$

Так как, цветные изображения представлены в RGB-пространстве [3], то цветовые слои независимы друг от друга. Следовательно, верным будет оценка размера сечения воронки K_{color} для цветного МДАИ $A_{color} = \langle M_{color}, F_{color} \rangle$ [3, 6, 7].

$$K_{color} = (K_{gray})^3 \quad (7)$$

Для решаемой задачи получаем оценку

$$K_{color} = \left(\sum_{l=1759}^{2381} C_{7254}^l \cdot 64^l \cdot 192^{7254-l} \right)^3 = 0.1051671340 \cdot 10^{52409}$$

Согласно (7) можно рассчитать вероятность попадания фиксируемых изображений в сечение воронки в МДАИ цветных изображений в соответствии с (8) [3, 6, 7].

$$P^* = P(I_{color} \in N_{color}) = \frac{K_{color}}{256^{3nm}} = \frac{0.105167134 \cdot 10^{52409}}{0.131257799 \cdot 10^{52409}} = \frac{0.105167134 \cdot 10^{52409}}{0.131257799 \cdot 10^{52409}} \approx 0.8 \quad (8)$$

Поиск оптимальных значений маски фильтра и порога конвертирования

Математический метод моделирования обработки и анализа изображений для вычисления площади объекта представляется в МДАИ в виде (9).

$$\begin{aligned} S_{pix} &= \text{Alg}(I_{color}; < n, \theta >) \\ \{ I_{bin} &= \|z_{ij}\|, I_{gray} = \|y_{ij}\|, I_{color} = \|< r_{ij}, g_{ij}, b_{ij} >\| \\ \|y_{ij}\| &= O_T^{color \rightarrow gray}(\|x_{ij}\|; *), \quad y_{ij} = \left\lceil \frac{r_{ij} + g_{ij} + b_{ij}}{3} \right\rceil \\ \overline{\|y_{ij}\|} &= O_T^{medfilter}(\|y_{ij}\|; (n, n)), \quad \overline{y_{ij}} = \text{med}\{f_{k=1, \overline{n \cup n}} | (f_k \leq f_{k+1}) \wedge (f_k \in \{y_{i-n, j-n}, \dots, y_{i+n, j+n}\})\} \quad (9) \\ \|z_{ij}\| &= O_T^{gray \rightarrow bin}(\|255 - \overline{y_{ij}}\|; *), \quad z_{ij} = \begin{cases} 0, & \overline{y_{ij}} < \theta \\ 1, & \overline{y_{ij}} \geq \theta \end{cases} \\ S_{pix} &= \sum_i \sum_j z_{ij} \end{aligned}$$

В ходе обработки изображений (конвертирования) в (9) варьируются два параметра – апертура медианного фильтра (n, n) и порог конвертирования θ полутоновых изображений в бинарные изображения. В таблице приведена программа на языке MATLAB, соответствующая методу (9).

Таблица. Программа MATLAB с фильтрацией и конвертированием

Функция измерения площади	Комментарии к программе
<pre>function s=imgenrgb22(p) global im; im1=rgb2gray(im); im2=medfilt2(im1,[p(1) p(1)]); invim2=255-im2; im3=im2bw(invim2,p(2)); res=sum(sum(~im3)); s=fit(res); end</pre>	конвертирование цветного изображения применение медианного фильтра инверсия полутонового изображения конвертирование в бинарное изображение вычисление суммы черных точек вычисление функции пригодности ГА

На рисунке 2 изображена поверхность, описываемая методом (9) и функцией измерения площади для $n \in [2; 10]$ и $\theta \in [0; 1]$. Исходя из него можно заключить, что функция измерения площади (таблица) достигает

минимального значения 0 более чем в одной точке. Например, пара $\langle n, \theta \rangle = \langle 5, 0.6 \rangle$ является такой точкой экстремума. Однако, как показывает наложение обработанного изображения (рис. 3, слева) с начальным изображением (рис. 3, справа), даже при минимальном значении функции пригодности ГА (целевая функция), существует отклонение в искомых пикселях.

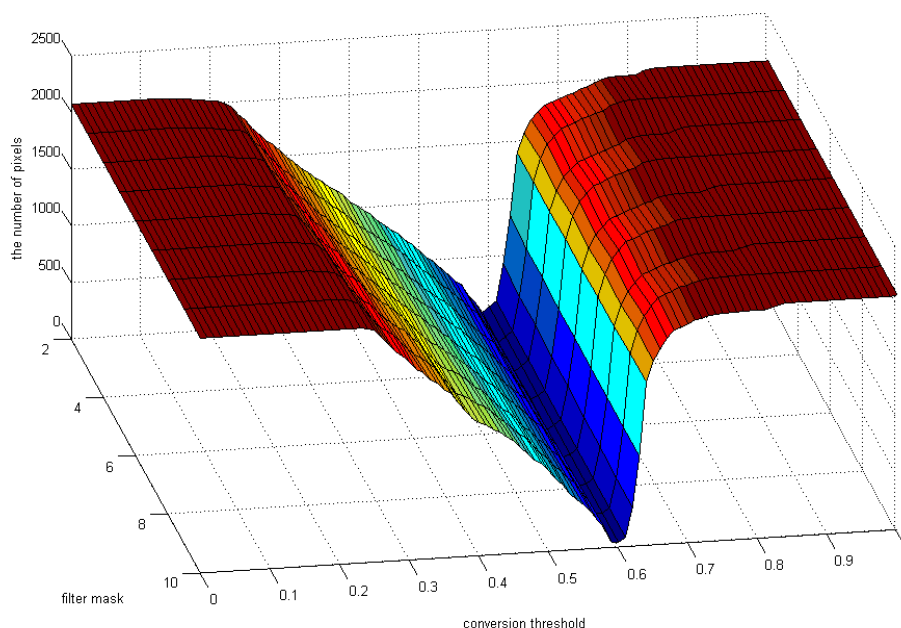


Рис. 2. График функции принадлежности ГА для метода (9)



Рис. 3. Измерение площади объекта для маски фильтра $n = 5$ и порога конвертирования $\theta = 0.6$ (слева) и наложение изображения площади (слева) на реальное изображение объекта (справа)

На понятном языке эту проблему можно сформулировать следующим образом. Метод обработки и анализа изображений (9) сохраняет форму

объекта интереса со всеми присущими особенностями. Часть значимых пикселей объекта теряются в ходе конвертирования. Утраченные пиксели замещаются новыми «псевдопикселями» объекта интереса, что можно объяснить применением операции усреднения яркостей смежных пикселей медианным фильтром (рис. 3, справа). Именно за их счет анализ (измерение площади объекта) остается в рамках допустимой точности. Усложнение метода обработки и анализа изображений (9) методами восстановления изображений и морфологического анализа позволит минимизировать приобретение объектом интереса «ложных» пикселей и уточнить модель объекта интереса (рис. 3, слева).

Заключение

Применение генетических алгоритмов в модифицированных дескриптивных алгебрах изображений позволяет упростить вычислительный процесс анализа изображений. В статье рассматривается пример вычисления площади объекта «Озеро» для вида сверху этим способом. Основным результатом исследований в данной работе является отказ от моделей изображений в классическом представлении.

Список литературы

1. Барталев С.А., Златопольский А.А., Галеев А.А., Ефремов В.Е., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Флитман Е.В., Щербенко Е.В. Автоматизированное уточнение площадей, пройденных лесными пожарами, по данным приборов HRV, HRVIR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - № 2. – Т. 6. – 2009. – С. 335-342.
2. Потапов А.А., Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Пахомов А.А., Герман В.А. Новейшие методы обработки изображений / Под. ред. А.А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
3. Исхаков А.Р., Маликов Р.Ф. Моделирование систем технического зрения в модифицированных дескриптивных алгебрах изображений: монография. – Уфа: Издательство БГПУ, 2015.
4. Бураков М.В. Генетический алгоритм: теория и практика. – СПб: ГУАП, 2008.
5. Озеро на территории г. Уфа [Электронный ресурс]: режим доступа - <https://yandex.ru/maps/172/ufa/?ll=56.100702%2C54.800877&z=15&mode=search&l=sat&text>
6. Исхаков А.Р. Параметрический синтез систем технического зрения в модифицированных дескриптивных алгебрах изображений // Исследования наукограда. – 2015. –Т.12, №2. – С. 24-31.
7. Iskhakov A.R. Mathematical methods of modeling of image processing and analysis in the modified descriptive algebras of images. Journal of Computational and Engineering Mathematics. Vol. 3, No. 1, 2016.

В.Ф. Филаретов, д.т.н., профессор, filaret@dvo.ru

Д.А. Юхимец, д.т.н., undim@dvo.ru

А.В. Зуев, к.т.н., zuev@dvo.ru

А.С. Губанков, к.т.н., gubankov@dvo.ru

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

МЕТОД СОВМЕЩЕНИЯ СИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЛАКОВ ТОЧЕК

Аннотация: в докладе предложен метод совмещения трехмерных облаков точек, полученных после сканирования симметричных деталей с помощью систем технического зрения (оптических, лазерных), установленных на многостепенные промышленные роботы. Рассмотрена модификация известного алгоритма ICP (Iterative Closest Point), которая позволяет значительно повысить точность совмещения этих облаков точек, содержащих множество одинаковых участков.

Ключевые слова: облако точек, ICP, симметричная деталь, система технического зрения, робототехника

METHOD OF COMBINING OF SYMMETRICAL THREE-DIMENSIONAL POINT CLOUDS

V.F. Filaretov, professor, filaret@dvo.ru

D.A. Yukhimets, Dr. Sc., undim@dvo.ru

A.V. Zuev, PhD, zuev@dvo.ru

A.S. Gubankov, PhD, gubankov@dvo.ru

Institute of automation and control processes FEB RAS, Vladivostok, Russia

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract: method of combining of three-dimensional clouds of points obtained after scanning the symmetric details using vision systems (optical, laser) installed on industrial robots is proposed. Considered modification of the known algorithm ICP (Iterative Closest Point) allows to significantly improve the accuracy of alignment of these point clouds containing many of the similar areas.

Key words: point cloud, ICP, symmetrical detail, vision system, robotics

В автомобиле-, приборо- и авиастроении усиливается тенденция использования промышленных роботов (ПР) для выполнения операций обработки различных видов деталей (фрезерование, гидроабразивная и лазерная резка и т.п.) со сложной конфигурацией. Технологии обработки таких деталей достаточно хорошо развиты и отработаны, в случаях, когда эти детали мало отличаются от их САД-моделей, обладают высокой жесткостью, точно и жестко зафиксированы в конкретном месте детерминированной рабочей зоны ПР [1]. Однако реальное использование этих технологий при большой номенклатуре выпускаемых деталей в условиях мелкосерийного производства связано с большими временными и финансовыми затратами, поскольку требует дополнительной разработки и точного изготовления вспомогательной оснастки или даже перестроения всего производственного процесса в целом. В результате требуются дополнительные затраты на доработку и корректировку управляющих программ ПР, препятствующие широкому внедрению роботизированных технологий в современное производство.

В работах [2, 3] описана обобщённая технология точной обработки гибких деталей произвольной геометрической формы с помощью ПР, оснащаемых системами технического зрения (СТЗ). Она предполагает 1) простую и быструю фиксацию гибкой детали в универсальной оснастке с возможной деформацией ее геометрической формы; 2) сканирование закрепленной детали с помощью СТЗ; 3) совмещение эталонной САД-модели детали с ее моделью, полученной после сканирования, для точного определения мест обработки; 4) автоматическое формирование траекторий движения рабочего инструмента ПР. Однако исследования показали, что предлагаемый алгоритм (см. шаг 3) совмещения трехмерных моделей, не позволяет точно совмещать облака точек, описывающих САД-модели и отсканированные с помощью СТЗ детали, если эти детали симметричные или имеют множество идентичных (схожих) участков.

В результате, в докладе предложен метод совмещения трехмерных САД-моделей симметричных или содержащих одинаковые участки деталей с моделями, полученными после их закрепления в оснастке и сканирования.

Модификация метода совмещения двух симметричных облаков точек

На рисунке 1 показан пример детали, имеющей 12 идентичных участков (бобышки на детали).

Результат работы ранее созданного алгоритма совмещения двух облаков точек для этой детали показан на рис. 2, где синим цветом отмечено облако точек, соответствующее сканированной детали, а красным – САД-модели.

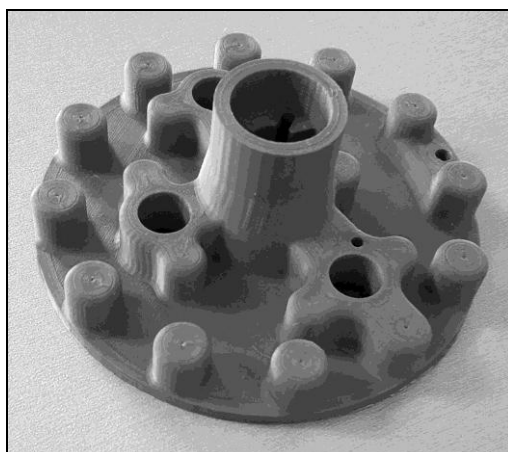


Рис.1. Пример детали с идентичными участками

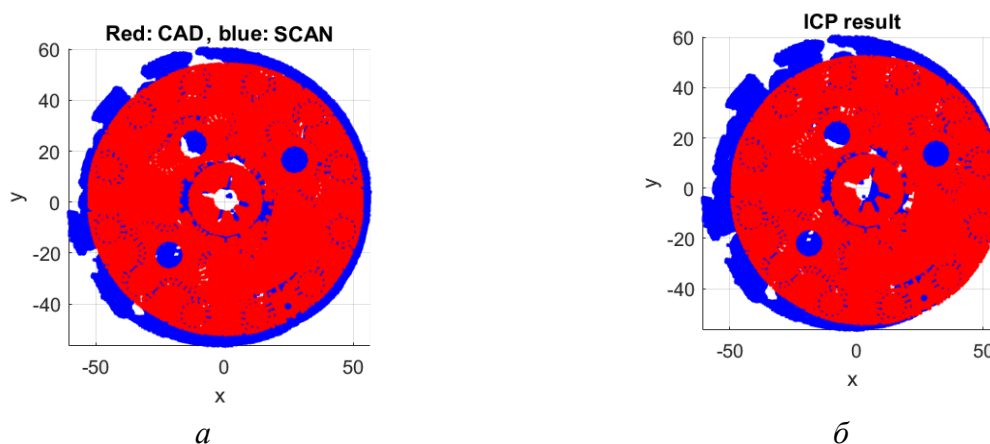


Рис. 2. Пример совмещения трехмерной модели детали, имеющей множество идентичных участков, с CAD-моделью на основе существующего алгоритма (*а* – исходное положение, *б* – результат совмещения)

Из него видно (см. рис. 2б), что созданному алгоритму не удалось осуществить качественное совмещение указанных двух облаков точек. При этом среднеквадратичное отклонение ближайших точек облаков, описывающих модель сканированной детали и ее CAD-модель равно 1,4 мм. Очевидно, что полученная малая точность совмещения приведет к существенным ошибкам при формировании траектории движения рабочего инструмента ПР.

Для объяснения и последующего устранения выявленного негативного эффекта более подробно рассмотрим используемый алгоритм совмещения созданных двух облаков точек деталей, которые составляют входные данные для его работы. Первое (передвигаемое) - уплотнённое облако точек $\mathbf{D}$, полученное из эталонной CAD - модели, а второе - $\mathbf{M}$ – облако, полученное от СТЗ при сканировании детали. Математически задачу совмещения двух этих облаков точек можно сформулировать в виде [4-6]:

$$E(a, \mathbf{D}, \mathbf{M}) = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} c_i, \quad (1)$$

$$a^* = \arg \min_a E(T(a, \mathbf{D}), \mathbf{M}), \quad (2)$$

где E – среднеквадратичная ошибка совмещения облаков точек; $c_i = \|d_i - m_j\|^2$ – квадрат расстояний между парами ближайших точек из облаков $\mathbf{D}$ и $\mathbf{M}$; $d_i \in \mathbf{D}, i = \overline{1, N_d}$ и $m_j \in \mathbf{M}, j = \overline{1, N_m}$ – ближайшие точки из облаков $\mathbf{D}$ и $\mathbf{M}$, соответственно; N_d, N_m – количество точек в облаках $\mathbf{D}$ и $\mathbf{M}$, соответственно, которое может быть различным; $T(a, \mathbf{D})$ – функция трансформации облака точек $\mathbf{D}$ в облако точек $\mathbf{M}$; a – параметр функции трансформации; a^* – оптимальный параметр функции трансформации, который минимизирует функционал (1).

Поскольку передвигаемым облаком является облако $\mathbf{D}$, то количество пар ближайших точек будет равно N_d . Таким образом, задача (1) и (2) совмещения двух облаков точек формулируется как задача минимизации среднеквадратичного отклонения между парами ближайших точек этих облаков. При этом в параметр a функции T входят элементы матрицы поворота $\mathbf{R}_{CP}$ и вектора смещения $\mathbf{t}_{CP}$, которые характеризуют расположение одного облака относительно другого.

Описанный алгоритм позволяет относительно легко и точно совмещать трехмерные модели отсканированных деталей с их эталонными САД – моделями, если эти детали не имеют идентичных участков. Однако, если такие участки на деталях присутствует, то качество такого совмещения значительно снижается. Это объясняется тем, что рекуррентный алгоритм совмещения двух облаков точек на каждом шаге своей работы обеспечивает подбор такого положения одного облака относительно другого (т.е. подбор такой матрицы $\mathbf{R}_{CP}$ и вектора $\mathbf{t}_{CP}$), чтобы величина среднеквадратичного отклонения между парами ближайших точек этих облаков была минимальной (т.е. ищется минимум функционала (2)). При наличии одинаковых участков на деталях в процессе работы алгоритма возникают локальные минимумы функционала (2), когда происходит совпадение этих одинаковых участков. При этом смещение облака $\mathbf{D}$ относительно облака $\mathbf{M}$ на следующей итерации алгоритма приводит к увеличению среднеквадратичного отклонения, и алгоритм прекращает свою работу. Достигнутый локальный минимум функционала (2) не будет соответствовать его глобальному минимуму, обеспечивающему полное совпадение облаков.

Для решения описанной проблемы в докладе предлагается использовать модификацию алгоритма, которая включает следующие этапы.

1) Предварительное совмещение двух облаков точек $\mathbf{D}$ и $\mathbf{M}$.

2) Поворот облака $\mathbf{D}$ относительно оси перпендикулярной плоскости, содержащей одинаковые участки детали на некоторый угол α . Значение этого угла подбирается для каждой детали индивидуально в процессе предварительной настройки. Количество таких поворотов облака $\mathbf{D}$ равно $n = 2\pi/\alpha$.

3) Повторное совмещение облаков точек D и M , сохранение в управляющей ЭВМ данных о полученном среднеквадратичном отклонении.

4) Повторение п.п. 2-3 до тех пор, пока количество поворотов облака D не достигнет рассчитанного значения n .

5) Выбор среди полученных среднеквадратичных отклонений наименьшего. Если полученное на этом этапе совмещение облаков точек выполнено с отклонениями $E > E_{\text{доп}}$, где $E_{\text{доп}}$ - допустимая величина среднеквадратичного отклонения, то совмещение указанных облаков повторяется после отбрасывания некоторого количества пар точек. Отбрасывание этих точек обеспечивает нечувствительность процесса совмещения к негативным «выбросам» и другим дефектам облака, полученного при сканировании детали. Указанные пары точек определяются по большим, чем у других пар, расстояниям между ними. При этом вначале формируется массив P пар ближайших точек облаков M и $D' = T(a, D)$. Затем по возрастанию расстояния между точками в каждой паре производится сортировка массива P , содержащего пары ближайших точек облаков M и D' . Из полученного массива P_s удаляется $N_{\text{neg}} = \text{round}(N_m \eta)$ элементов, где η - доля пар ближайших точек, которые не должны учитываться при работе алгоритма совмещения.

Если после повторного совмещения результирующее среднеквадратичное отклонение будет больше допустимого, то последний шаг повторяется, с увеличением доли отбрасываемых пар точек на величину $\Delta: \eta(k+1) = \eta(k) + \Delta$, где k – номер итерации использования алгоритма совмещения облаков точек. При этом новую итерацию совмещения облаков точек следует начинать из положения, которое было достигнуто на предыдущей итерации. Полученные итоговые значения матрицы R_{CP} и вектор t_{CP} используются в дальнейшем при планировании траектории движения рабочего инструмента ПР.

На рис. 3а показан результат выполнения п. 4 модифицированного алгоритма для детали (см. рис. 1) с $n = 12$, с помощью которого обеспечивается достижение значения среднеквадратичного отклонения между парами ближайших точек, равного 0,2 мм, а на рис. 3б – результат последующего отбрасывания пар точек с большими отклонениями. Из этого рисунка видно, указанный алгоритм обеспечил качественное совмещение двух облаков точек. Среднеквадратичное отклонение при этом не превысило 0,1553 мм.

Заключение

Предложенная модификация алгоритма совмещения двух облаков точек, описывающих модель детали, полученную с помощью СТЗ, и CAD-модель, позволяет обеспечить точное совмещение этих облаков для симметричных

деталей или деталей, имеющих множество идентичных участков. В результате удалось значительно повысить точность получения информации о координатах и ориентации обрабатываемых деталей.

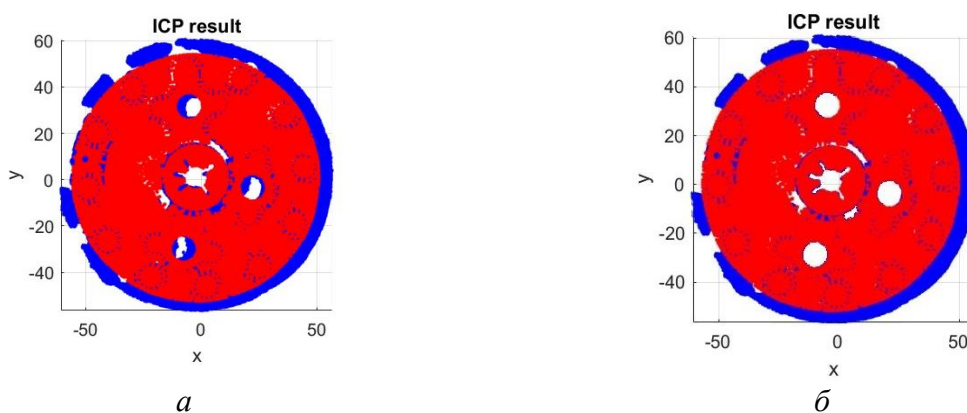


Рис. 3. *а* – результат выполнения модифицированного алгоритма, *б* – после отбрасывания пар точек с большими отклонениями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00718.

Список литературы

1. Григорьев С. Н., Андреев А. Г., Ивановский С. П. Современное состояние и перспективы развития промышленной робототехники // Мехатроника, автоматизация, управления. -2013. -№ 1. - С. 30-34.
2. Filaretov V., Zuev A., Yukhimets D., Gubankov A., Mursalimov E. The Automatization Method of Processing of Flexible Parts without their Rigid Fixation // Procedia Engineering, 2015, vol.100, pp. 4–13.
3. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Зуев А.В., Губанков А.С., Мурсалимов Э.Ш. Разработка метода совмещения трехмерных моделей обрабатываемых деталей с их CAD-моделями при наличии деформаций // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2016. - №3. - С. 60-69.
4. Campbell R., Flynn P. A survey of free-form object representation and recognition techniques// Computer Vision and Image Understanding, 2001, vol. 81(2), pp. 166–210.
5. Fitzgibbon A. Robust registration of 2d and 3d point sets //Image and Vision Computing, 2003, vol. 21(13-14), pp.1145-1153.
6. Liu R., Burschka D., Hirzinger G. A Novel Approach to Automatic Registration of Point Clouds //Proc. of Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007, pp. 401-404.

В.А. Углев, к.т.н., доцент, uglev-v@yandex.ru
Сибирский федеральный университет, г. Железногорск, Россия
Д.В. Егорова, студент, dasha.eg@mail.ru
Сибирский аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Россия

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ УЧЁНОГО И МЕТОДЫ GRAPH MINING

Аннотация: В статье анализируются принципы формирования и отображения личного профиля учёного как сервиса наукометрических систем. Отмечаются недостатки существующих сервисов, а так же предлагаются некоторые пути их совершенствования. Рассматриваются методы Graph Mining (картирование), применение которых может потенциально повысить востребованность и практическую значимость применения наукометрических систем непосредственными участниками научных сообществ.

Ключевые слова: наукометрия, публикация, личный профиль учёного, карта публикаций, Graph Mining, библиография, прогнозирование, анализ

PUBLICATION ACTIVITY OF A SCIENTIST ANALYSIS AND GRAPH MINING METHODS

V.A. Uglev, PhD, docent, uglev-v@yandex.ru
Siberian Federal University, Zhelznogorsk, Russia
D.V. Egorova, student, dasha.eg@mail.ru
Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The article analyses principles of formation and display of the personal profile of a scientist as a service scientometric systems. Shortcomings of existing services, and proposes some ways to improve them. Discusses methods for Graph Mining (mapping), which could potentially increase the relevance and practical importance of application of scientometric systems direct participants in scientific communities.

Key words: scientometrics, publication, personal profile scholar, publication, Graph Mining, bibliography, forecasting, analysis

Анализ публикационной активности учёных является одним из немногих доступных и методически проработанных средств наукометрии – дисциплине, изучающей эволюцию науки через многочисленные измерения

и статистическую обработку научной информации [1]. Базовыми задачами наукометрии являются выявление новых тенденций в научном знании, отслеживание их динамики и прогнозирование. Все эти задачи решаются по отношению к отдельным авторам, авторским коллективам / научным школам, организациям и изданиям (в основном периодических). В отдельных случаях, результаты, полученные с помощью наукометрии, позволяют решать задачи мониторинга качества и управления (например, на уровне министерства науки и образования). Поэтому традиция оперировать индексами цитирования [2], как интегральным показателем научной продуктивности учёного, имеет важное значение, но не отражает объективной картины происходящего (см. в [3] подробную критику подхода, основанного на индексах).

Инструментом оценки продуктивности научной активности, опираясь на библиографические данные, являются базы данных научных публикаций. Например, сравнительно молодой российский индекс научного цитирования (РИНЦ), базирующийся на данных сайта eLibRARY.ru, опирается на данные о 24 млн. статей и 240 млн. пристатейных ссылок (данные приведены на начало декабря 2016 г.). Очевидно, что их создание и широкое продвижение преследует не только цели повысить доступность новых результатов и оценить уровень науки, но и помочь научно-технической разведке стран-«партнёров» в сборе оперативной информации. При этом доступ к полным текстам и настоящим инструментам аналитики имеет лишь ограниченный круг лиц, остальные же довольствуются индексами цитирования и банальными графиками динамики публикаций. Эффективность такого подхода для конечного пользователя не слишком велика: когда наукометрическая система включает огромный массив разнородных данных, а конечный пользователь ограничен в возможностях полноценно размещать там свои результаты работы (особенно по тематикам специального назначения), то личный профиль/паспорт/карта учёного (ЛПУ) приобретает формальный характер и не отражает специфики персональной активности. На основании отмеченных недостатков возникает следующий вопрос: каким образом можно повысить информативность и результативность агрегации данных о научной деятельности учёных, опираясь на вторичные данные о публикациях, т.е. на те же библиографические данные? Для этой цели мы будем опираться на достижения в области Data Mining, особенно на те, которые ориентированы на визуализацию.

Какие источники информации о научной активности учёного можно считать самыми достоверными? Это отнюдь не базы наукометрических ресурсов или научных поисковых сервисов (например, сервис <https://scholar.google.ru>), а данные, которые сообщает каждый автор о себе. Самые распространённые формы, это научные социальные сети (например, <https://www.researchgate.net>), профильные базы научных учреждений (например, система «ИСТИНА» МГУ им. М.В. Ломоносова

<http://istina.msu.ru>) или библиотечные каталоги научно-учебных заведений, аккумулирующие данные из бланков отчётности учёных о проделанной ими работы за определённые периоды времени. Во всех этих случаях источником информации для наукометрической базы является непосредственно учёный, заинтересованный в том, чтобы показать проделанную работу в полном объёме. Поэтому стратегия, при которой формирование ЛПУ идёт от издательств к базам – не конструктивен. Тем более, если это касается работ, не связанных с публикацией статей или патентованием (отчёты по НИРам и НИОКРам, учебно-методические издания, публикации начинающих учёных, монографии и пр.). Именно преимущества подхода web 2.0, где контент формируется пользователем, здесь проявляются в полной мере (как, кстати, и его недостатки). Двойной контроль обеспечивает только формирование электронного каталога с полными текстами, которыми обычно занимается библиотечное подразделение профильных организаций.

Рассмотрим, что традиционно включается в ЛПУ. Это три блока информации: персональные данные учёного (ФИО, место работы, должность, направления интересов и пр.); библиографические записи и их характеристики (число цитирований, число просмотров/загрузок и пр.); показатели динамики отдельных характеристик научной работы учёного (наукометрические индексы учёного, соавторы, частотно-временные распределения отдельных характеристик публикаций и пр.). Третий блок традиционно представлен в виде одного или совокупности графиков/гистограмм (например, см. рис.).

Осуществив сравнительный анализ различных наукометрических систем и каталогов, нами был сделан ряд выводов, касающихся ЛПУ:

- ориентация на учёт данных, поступивших либо от отечественных издательств, либо от зарубежных (удачно совместить оба канала поступления данных пока ни одной наукометрической системе не удалось);
- ориентация отображения данных на поверхностное обобщение (считаются только суммы, проценты, цитируемость);
- отображение графиков максимально упрощено и не предполагает решения серьёзных задач (прогнозирование, выявление тенденций, анализ работы групп учёных и пр.);
- временная/категорийная привязка данных на графиках, линейно отражающая динамику отдельных показателей (комбинированные варианты отображения не применяются);
- наложение событий в ЛПУ на историческую линию, отображая лишь те, которые касаются исключительно публикационной активности (отсутствие персонального слоя с маркерами событий, а так же компактной формы отображения);

- отсутствие сервиса формирования организацией собственной формулы расчета рейтинга/индекса для своих учёных в рамках унифицированной наукометрической платформы.

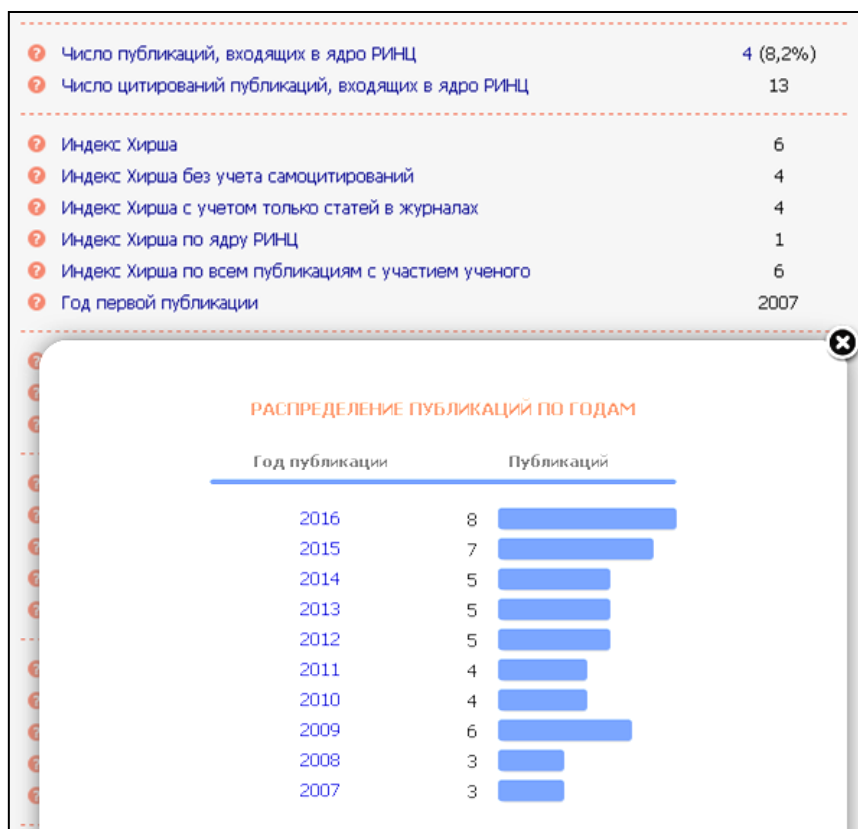


Рис. Пример фрагмента личного паспорта учёного в системе РИНЦ

Все эти обобщения (кроме последнего пункта) могут быть обусловлены тем, что «за кадром» существуют более продвинутые аналитические сервисы, но конечный пользователь, т.е. сам учёный, к ним не допущен даже в рамках собственного профиля. Такие наукометрические платформы становятся не так актуальны для отдельных учёных и аналитиков, имеющих перед собой задачу составления качественного прогноза научной активности сотрудников/учащихся или структурных подразделений и научных коллективов.

Попробуем сформулировать *принципы*, которые должны лежать в основе сервиса анализа и визуализации ЛПУ: научности и достоверности, комплексности учёта и анализа, динамичности, компактности, прогностичности, персонализации, интерпретируемости, доступности; масштабируемости процедур обобщения, многомерности, гибкости настроек, эффективности обратной связи.

Теперь рассмотрим вопрос путей потенциального повышения информативности ЛПУ с позиции его компоновки и методов отображения (визуализации). В качестве основы будем опираться на такую концепцию

искусственного интеллекта, как Data Mining. В связи с тем, что хранилище данных, содержащее в себе каталог библиографии учёных и их профили, даже для образовательного учреждения, за несколько лет наполнения будет оперировать достаточно большим набором данных. Поиск неявных (скрытых) закономерностей и комплексное отображение результатов анализа по результатам обработки массивов данных – это классические задачи Data Mining. Развитие же графических методов за последние 15 лет позволили сформироваться целому разделу Data Mining – Graph Mining. Рассмотрим отдельные элементы ЛПУ, эффективность отображения которых может быть значительно повышена с помощью методов Graph Mining:

- построение карты публикаций учёного в разрезе тематик, используя алгоритмы кластеризации (например, используя упругие карты [4]) и графы);
- демонстрация семантических связей публикации учёного с их различными характеристиками (пространством ключевых слов, тематик, соавторов, цитируемых и цитирующих публикаций и пр.) в виде графа облака тэгов, отражающего семантические зависимости между его элементами, а так же метрические расстояния в пространстве факторов;
- комбинирование осей отображения исходных и обобщённых данных (начиная от применения кубов данных [5], и оканчивая отображением данных в виде кластеров в гиперпространстве признаков);
- формирование «трэка» событий [6], позволяющего комплексно отобразить результаты научной работы учёного с возможностями обобщения и масштабирования (линейно-графовое предствалние или модель «маленького мира»);
- наложение личностных достижений учёного (текущих и куммулятивных) на общую карту публикаций подразделения/организации.

Практически все указанные возможности опираются на термин *карта публикаций*, который следует определить. Под картой публикаций будем понимать метрически и семантически обусловленную совокупность данных, прямо или косвенно характеризующих публикационную активности учёного в пространстве научной информации профильного сообщества (организации, проекта, отрасли). Таким образом, наукометрический сервис должен быть укомплектован набором карт (своеобразным атласом [7]), отображающих динамику совокупности характеристик научной деятельности учёного или их группы.

Отображение на «трэке» событий *пользовательских маркеров* (особенно *персональных*), даёт возможность не только отслеживать успехи конкретного учёного, но и устанавливать причины тех или иных изменений его активности. Например, снижение публикационной активности может быть обусловлено фактом защиты диссертации, изменением должности, рождением ребёнка и пр. Описание таких маркеров может носить точечный или интервальный характер и обязательно иметь субъективную оценку

самого учёного. Для их комплексного учёта потребуется не только аналитические алгоритмы, но и алгоритмы искусственного интеллекта.

Создание других слоёв маркеров событий, таких как *организационные*, *отраслевые* или *глобальные*, так же могут помочь в выявлении тенденций и причин изменения динамики научной активности. Например, ни одна реорганизация ВУЗа не проходит бесследно для работающих в ней учёных, как и изменения в порядке присуждения учёных степеней [6, 8]. Данный подход может быть полезен не только при прогнозировании результативности работы как отдельных учёных и коллектива отдельно взятой организации, но и научных школ. Методику оценки прогноза можно развить до оценки потенциала, применительно к тому или иному направлению работы (например, относительно конкретного гранта РГНФ или федеральной целевой программы). Тогда появляется возможность осуществления направленного информирования научных коллективов и отдельных учёных как в рамках организации, так и в рамках научного направления в масштабах страны.

С правовой точки зрения возникает вопрос легитимности открытости и общедоступности подобных сервисов. Очевидно, что анализ подобного набора информации происходит применительно к персональным данным. В «развитой» Европе и Соединённых Штатах Америки целые научные коллективы подвергаются травле, если становится широко известна специфика их исследований (например, генетики, биологи, нейрофизиологи, экспериментирующие над подопытными животными). С одной стороны, все эти данные находятся в открытом доступе и нет никакой проблемы их обобщить и проанализировать. С другой стороны, имеется объективная необходимость в обезличенном анализе информации о научной активности в разрезе отраслей и тематик, а так же прогнозирования научного потенциала отдельно взятого учёного в рамках организации-работодателя. Поэтому функционирование подобных сервисов может быть организовано либо на базе самих организаций, занимающихся наукой (например, научные библиотеки ВУЗов и НИИ), или на унифицированной платформе, по аналогии с eLibroary.ru, но с разделением прав доступа:

- общий доступ с минимальным набором аналитических функций;
- персональный доступ с детальным анализом ЛПУ и обобщением по направлениям интересов учёного;
- должностной доступ для сервисов прогнозирования научной активности и оценки потенциала учёных и исследовательских групп, а так же подразделений организации (слои персональных маркеров учёных при соответствующей настройке политики безопасности профиля в анализ не включается).

Ключевым инструментом во всех этих работах должен быть не только математический аппарат, но и методы эффективной визуализации посредством Graph Mining. Это в значительной степени повысит

востребованность и эффективность функционирования наукометрических систем. Поэтому они должны быть ориентированы не только на профессиональных аналитиков, но и на широкие слои научных работников.

Список литературы

1. Большой энциклопедический словарь. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2002. – 1456 с.
2. Писляков В.А. Методы оценки научного знания по показателям цитирования // Социологический журнал. – №1. – 2007. – С 128-140.
3. Орлов А.И. Наукометрия и управление научной деятельностью // Управление большими системами. – Вып. 44. – 2013. – С. 538-568.
4. Горбань А.Н., Зиновьев А.Ю., Питенко А.А. ViDaExpert: программа для нелинейной визуализации и анализа многомерных данных // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы VI Всероссийской конференции. – Красноярск: Монография, 2014. – С. 120-126.
5. Углев В.А., Сапранькова А.А. Интеллектуальный информационный анализ как основа оценки и управления научным потенциалом // Гуманитарные аспекты становления информационного общества – Харьков: ХНУРЭ, 2013. – С. 116-118.
6. Углев В.А. Применение оценки научного потенциала ВУЗа по результатам анализа научных публикаций // Новые информационные технологии в образовании: Материалов Международной научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 2. – Екатеринбург, 2008. – С. 283.
7. Углев В.А. Многообразие карт в научном познании: между семиотикой и картосемиотикой // Геоконтекст: Научный альманах. – №2. – 2014. – С.30-38.
8. Углев В.А. Студенческая наука сегодня: миф или реальность? // Современные трансформационные экономические и социально-политические процессы: Материалы Международной научно-практической конференции. – Абакан: ХТИ-филиал СФУ, 2010 – В 2 ч. Ч. 1. – С. 213-218.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПОДБОРУ СОТРУДНИКОВ В ОРГАНИЗАЦИЮ

Аннотация: В статье показана необходимость применения методов искусственного интеллекта в процессе профессионального психологического отбора. В качестве такого метода выбрана интеллектуальная система поддержки принятия решений. В статье также рассмотрены этапы методики комплексной оценки различных характеристик личности претендента на вакантную должность и его компетенций, в соответствии с профстандартами.

Ключевые слова: экспертная система, система поддержки принятия решений, профотбор, компетенции, психология личности

THE METHODOICAL SUPPORT OF THE INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PROFESSIONAL SELECTION

A.N. Chaschina, undergraduate, s-n-e-z-h-i-n-k-a@mail.ru
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

Abstract: The article shows the need to use artificial intelligence techniques in professional selection. Intelligent Decision Support System was chosen as such means. Also reviewed the steps of the technique for comprehensive evaluation personality characteristics claimant and competencies claimant.

Key words: Expert System, Decision Support System, professional selection, competence, Personality psychology

При подборе сотрудников в организацию очень важно получить как можно более полную и точную информацию о кандидате на вакантную должность. Проведение собеседования позволяет посмотреть на претендента и оценить его лишь поверхностно. Этого часто бывает недостаточно для принятия правильного решения о приеме на работу (либо отказе кандидату на вакантную должность). Первое впечатление бывает обманчиво, что влечет за собой убытки, которые в дальнейшем несет организация, принявшая на

работу некомпетентного работника [1-3]. Для проведения более качественного профотбора требуются специальные методы и средства, позволяющие выявить различные стороны личности человека, претендующего на должность, его качества, навыки, способности и т.д. Решить эту задачу можно, если применить интеллектуальную систему поддержки принятия решений [4, 5]. Актуальной задачей является методическое обеспечение, позволяющее обоснованно применять таких системы на практике.

Процесс отбора, описанного в виде методики, предполагает оценку различных характеристик личности претендента на вакантную должность, а также его компетенций, в соответствии с профстандартами [6]. Оценка знаний будет проводиться с использованием 3-параметрической модели Раша-Бирнбаума [7-9]. Что касается выявления компетенций, существует методика извлечения знаний о компетентностях из протоколов автоматизированной обучающей системы, в основу которой положен механизм когнитивных карт диагностики знаний [10-12]. Выявление психологических особенностей личности будет осуществляться посредством психодиагностических методик [13-14]. Одним из методов реализации системы поддержки принятия решений является экспертная система [4]. В нашем случае экспертная система должна содержать в себе сведения о необходимых качествах, способностях, компетенциях сотрудников, успешно справляющихся со своей нагрузкой, а также качества, навыки, особенности личности сотрудников, не справляющихся со своими обязанностями. Полученные данные должны обрабатываться интеллектуальной системой комплексно.

Методика будет включать в себя несколько этапов. На первом этапе составляются эталонные модели сотрудников для каждой из учитываемых профессий в соответствии с профстандартами [6]. Модели заносятся в базу знаний интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Модель личности включает в себя [15-20]:

- а) психические характеристики личности,
- б) профессиональные качества,
- в) интеллектуальные способности личности,
- г) личностные особенности и направленность,
- д) оценки уровня развития компетентностей.

На этом этапе для каждой из профессий должна быть составлена своя система продукционных правил, учитывающая как можно более полный список критериев успешной деятельности сотрудника. Это необходимые умения, соответствующие требованиям профессии, каждое из которых прописывается отдельно; наличие необходимых знаний о профессии вообще, а также о некоторых нюансах профессии; соответствие психофизиологических показателей требованиям профессии, каждый из

которых также прописывается отдельно; соответствие интеллектуальных способностей; личностные особенности, способствующие успешной деятельности, а также личностные особенности, мешающие успешной деятельности сотрудника; соответствие профессиональных качеств [6, 18].

Второй этап предполагает обработку анкетных данных и формирование вопросов теста в соответствии с требованиями той должности, на которую претендует кандидат. Для формирования списка вопросов требуется база знаний на основе производственных правил, которая позволит из базы данных выбирать те вопросы, которые помогут выявить наличие и соответствие показателей, являющихся определяющими для данной профессии [6, 18].

На третьем этапе автоматизированной системой, которую также включает разрабатываемая методика, обрабатываются ответы на тестовые задания, характеризующие кандидата на должность с психологической точки зрения, а также оценивающие его компетенции, знания, навыки и способности. Обработка идет отдельно по каждому из оцениваемых параметров.

Четвертый этап заключается в комплексной обработке полученных данных и составлении профиля претендента подобно тому, как это было сделано на первом этапе для эталонной модели, с применением системы производственных правил [6, 18].

Комплексная обработка и анализ данных на этом этапе предполагают наличие системы производственных правил, в соответствии с которыми определяется, обладает ли кандидат на вакантную должность необходимыми качествами, или его показатели не соответствуют уровню квалификации, достаточному для успешности трудовой деятельности в данном направлении. Как и на первом этапе, профиль претендента составляется из множества отдельных характеристик, различное сочетание которых при той или иной степени выраженности или степени развития могут давать положительный или негативный эффект в целом. Это в большей степени определяет, будет ли решение о приеме на работу положительным, или же претенденту придется отказать.

Профили разных кандидатов, претендующих на вакантную должность, заносятся в базу данных.

Далее, на пятом этапе, посредством интеллектуальной системы поддержки принятия решений [4, 5] происходит сопоставление полученных профилей кандидатов на вакантную должность с эталоном и ранжирование их относительно факта соответствия требованиям должности.

На этом этапе сравниваются сочетания различных показателей претендентов, что невозможно без применения системы поддержки принятия решений, после чего формируется список претендентов в порядке снижения вероятности успеха в трудовой деятельности в данном направлении. Первым в этом списке будет наиболее перспективный претендент, последним в списке будет наименее пригодный для данной должности претендент.

На шестом этапе происходит автоматическое формирование отчета с рекомендациями о приеме на работу наиболее подходящих претендентов, а также тех претендентов, которые по каким-то параметрам не соответствуют данной вакантной должности. Все результаты заносятся в базу данных.

На завершающем этапе лицо, принимающее решение, т.е. менеджер по работе с персоналом, на основании полученных результатов тестирования претендентов, обработанных интеллектуальной системой поддержки принятия решений, делает выбор по отношению к конкретной вакансии, с учётом [6, 18].

Базовые функции системы поддержки принятия решений (СППР) для данной методики отражены на рисунке 1 и привязаны к её этапам.

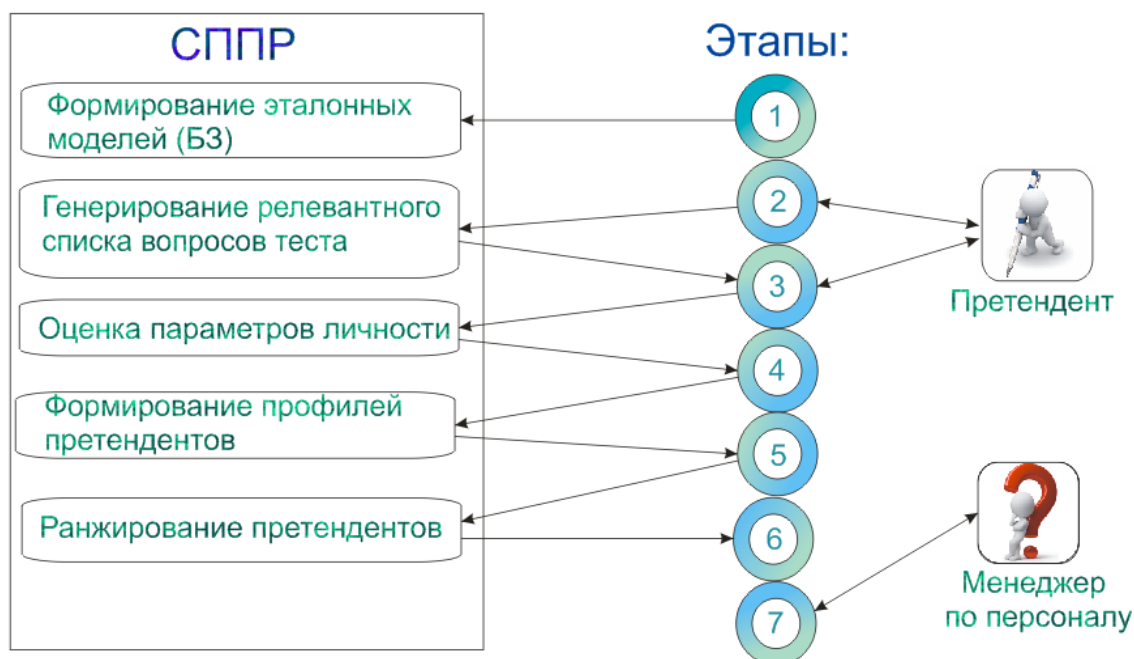


Рис. 1. Функции СППР для методики

Таким образом, протестировав кандидата на должность на наличие набора соответствующих характеристик, посредством системы поддержки принятия решений можно сравнить полученные данные с эталоном, и на основании этого принять обоснованное решение.

Список литературы

1. Бобровницкая М.М., Голубева О.Ю., Коняева Т.Н., Шойгу Ю.С. Методическое руководство по профессиональному психологическому отбору в системе МЧС России. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: МЧС России, 2006. – 383 с. [Электронный ресурс]: режим доступа – <http://www.studfiles.ru/preview/2030079/>.
2. Захаров И. В., Городецкий Б. И., Глушко А.Н. Профессиональный психологический отбор в военно-учебном заведении. – М.: МО СССР, 1990. – 138 с.

3. Психологическая оценка и прогнозирование профессиональной пригодности военных специалистов / ред. В.И. Пахомов. – М.: Военное издательство, 1988. – 264 с.
4. Герасимов Б.М., Дивизинюк М.М., Субач И.Ю. Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности / под общ. ред. д.т.н., проф. Герасимова Б.М. – Севастополь: Изд. центр СНИЯЭиП, 2004. – 320 с. [Электронный ресурс]: режим доступа – <http://www.studfiles.ru/preview/5367046/>.
5. Герасимов Б.М. Интеллектуальные системы поддержки решений управленческого и оперативного персонала. - Киев: Знание, 1989. - 19 с.
6. Официальный сайт Профессиональные Стандарты [Электронный ресурс]: режим доступа - <http://profstandart-kadry.ru>.
7. Rasch G. Probabilistic models for some intelligence and attainment tests // *Studies in mathematical psychology I*, Copenhagen: Nielsen & Lydiche (for Danmarks Paedagogiske Institut), 1960. – pp. 49-62.
8. Birnbaum A. Some latent trait models and their use in inferring an examinee's ability, In F.M. Lord & M.R. Novick (Eds.), *Statistical theories of mental test scores* // Reading (Mass.) Addison-Wesley, 1968. – pp. 397-479.
9. Летова Л.В. Точность моделирования латентных переменных с помощью модели Раша (часть 1) // *Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации»*, 2014. – № 6 [Электронный ресурс]: режим доступа - <http://web.snauka.ru/issues/2014/06/34399>.
10. Uglev V.A., Ustinov V.A. The new competencies development level expertise method within Intelligent Automated Educational Systems // *Trends in Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection. Advances in Intelligent Systems and Computing*. - 2014. – Vol. 293. – pp. 157-164. DOI 10.1007/978-3-319-07476-4_19.
11. Углев В.А. Автоматизация оценки уровня развития компетентностей при проведении аттестационных мероприятий / Сборник трудов I Всероссийской конференции. – Томск. – 2013. – С. 82-85.
12. Углев В.А. Методика извлечения знаний о компетентностях из протоколов автоматизированной обучающей системы подготовки операторов // *Нейроинформатика, её приложения и анализ данных: Материалы XXI Всероссийского семинара*. – Красноярск: ИВМ СО РАН. - 2013.
13. Бодалев А.А. Практикум по психодиагностике. Психодиагностические материалы. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 141 с.
14. Рабочая книга практического психолога: Технология эффективной профессиональной деятельности : пособие для специалистов, работающих с персоналом / ред. Э.О. Шиманская [и др.]. – М.: Изд. дом «Красная площадь», 1996. – С. 171-242.
15. Хьелл Л., Зиглер Д. Теории личности. Основные положения, исследования и применение. — СПб.: Питер Пресс, 1997. — 608 с.
16. Ананьев Б. Г. Психологическая структура человека как субъекта // *Человек и общество*. — 1967. — № 2. – С. 235-249.
17. Зацепин В. И. На пути к общей типологии личности. — СПб.: Теза, 2002. – 79 с.
18. Климов Е.А. Индивидуальный стиль деятельности в зависимости от свойств нервной системы. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1969. - 227 с.
19. Лазурский А. Ф. Классификация личностей. Издание второе. / Под ред. М.Я.Басова и В.Н. Мясищева. – Л.: ГИЗ, 1924. - 290 с.
20. Платонов К. К. Структура и развитие личности. — М.: Наука, 1986. – 256 с.

Секция 5

ПРОГРАММНАЯ И АППАРАТНАЯ СИМУЛЯЦИИ РАБОТЫ МОЗГА

АЛГОРИТМЫ СИМУЛЯТОРА РАСТУЩЕЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ЭЛЕМЕНТАМИ САМООБУЧЕНИЯ

Аннотация: В работе предлагаются алгоритмы симулятора нейронной сети, ориентированные на использование некоторых ее эффекторов в качестве источников для принятия решений по настройке, т.е. обучению, и перестройке структуры. Алгоритм предусматривает четыре варианта модификации сети – изменение параметров одиночных нейронов, изменение параметров межнейронных связей, добавление/удаление связей и добавление/удаление нейронов.

Ключевые слова: нейронная сеть, симулятор, самооценка, перестройка сети

ALGORITHMS GROWING NEURAL NETWORK SIMULATOR WITH SELF-LEARNING ELEMENTS

A.A. Maliavko, Ph.D., assistant professor, malyavko@vt.cs.nstu.ru

A.A. Denisov, undergraduate student, trall48@yandex.ru

A.E. Morozov, undergraduate student, trall48@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: In this paper we suggest algorithms of neural network simulator, oriented on use of some of its effectors as a source for making decisions about configuration, i.e. its learning and restructuring. Algorithm provides four network modification variants – changing parameters of single neurons, changing parameters of interneuron connections, creating or destructing connections between neurons, creating or removing neurons.

Key words: neural network, simulator, self-appraisal, network restructuring

Известно большое количество работ, посвященных исследованию растущих нейронных сетей. Среди них можно отметить: самоорганизующиеся нейронные карты [1], растущий нейронный газ [2], инкрементную нейронную сеть SOINN [3] и ее усовершенствованный вариант ESOINN [4], нейронное дерево [5] и многие другие. Подавляющее большинство подобных исследований посвящено созданию сетей для

классификации объектов, которые после обучения используются в циклическом режиме: запуск – восприятие сигнала с входа – обработка – формирование выходного сигнала – останов.

В то же время известно, что биологические системы функционируют, взаимодействуют с внешним миром и самообучаются непрерывно [6,7]. Поэтому предпринимаются попытки создания их аналогов. Например, в [8] предлагается реализовать создание непрерывно функционирующей самообучаемой и самомодифицирующейся искусственной нейронной сети на основе механизма выработки ею аналога эмоций [9].

В данной работе предлагается один из возможных механизмов реализации симулятора нейронной сети, осуществляющего создание, настройку/обучение и перестройку ее структуры на основе решений, частично вырабатываемых самой сетью.

Пусть имеется нейронная сеть, содержащая n рецепторов одного типа, 2 рецептора другого типа и, аналогично, m эффекторов некоторого типа и 2 эффектора особого типа. Сигналы всех рецепторов и эффекторов градуированы по некоторой шкале. Предполагается, что воздействия на рецепторы первого типа могут привести путем распространения сигналов по нейронам сети, находящейся между рецепторами и эффекторами, к срабатыванию одного или нескольких эффекторов. Предполагается, что состояния и сигналы нейронов сети также градуированы.

Механизмы функционирования нейронов и сети в целом (или алгоритмы симулятора при компьютерном моделировании) таковы, что срабатывания эффекторов первого типа никак не изменяют ее параметры, но срабатывания эффекторов особого типа могут приводить к перестройке сети. Выход одного из этих эффекторов воспринимается симулятором, как степень «удовлетворенности» сети результатами обработки сигналов с входных рецепторов, выход второго, соответственно, – как степень «неудовлетворенности». В [8] такие эффекторы названы эмоциональными и предложено использовать их для выработки решений о перестройке сети. В силу того, что сигналы этих эффекторов (будем называть их самооценочными или просто оценочными) градуированы, возможна выработка нескольких различных сочетаний их состояний.

Предполагается, что воздействия учителя на рецепторы второго типа, предназначенные для организации обратной связи (обучения) одновременно используются для модификации параметров и/или перестройки нейронной сети. Один из этих рецепторов воспринимается симулятором как «наказание», второй – как «поощрение». В силу того, что эти рецепторы градуированы, возможен ввод различных сочетаний их состояний (например – «очень плохо» и одновременно «немного хорошо»).

Предлагаются алгоритмы симулятора, целью которых является формирование «с нуля» нейронной сети, нужным образом реагирующей на

входные воздействия. Слова «нужным образом» относятся к точке зрения учителя сети на результаты ее работы. Учителем сети можно считать и того пользователя, который применяет обученный экземпляр сети для решения своих задач. Другими словами, обучение сети никогда не заканчивается. В любой момент времени на рецепторы «наказание/поощрение» учителем или пользователем могут быть поданы некоторые значения.

Термин «с нуля» в данном контексте означает, что в начальный момент времени в сети нет ни одного нейрона, соответственно нет ни одного пути передачи сигналов от рецепторов к эффекторам. Поэтому подача любого сочетания сигналов на любые входные рецепторы не приведет к появлению сигналов ни на одном эффекторе. Эта ситуация должна восприниматься симулятором как неудовлетворительно оцениваемая независимо от состояния рецепторов «наказание/поощрение».

Симулятор работает циклически. На каждой итерации цикла последовательно выполняются следующие шаги.

1. Формируется состояние всех входных рецепторов путем считывания очередной порции (фрейма) входных данных, подготовленной учителем, пользователем или внешней средой. До тех пор, пока не появятся новые данные на входе сети, симулятор в каждом цикле плавно снижает уровень значения каждого входного рецептора, обусловленный текущим фреймом входных данных. Темп снижения является одним из параметров симулятора, задаваемым учителем/пользователем. При наличии заранее подготовленного массива фреймов темп считывания их на вход сети определяется еще одним регулируемым параметром симулятора – минимальным количеством циклов симуляции сети между восприятием разных фреймов. При отсутствии такого массива сеть симулируется непрерывно независимо от наличия новых данных на входе.

2. Симулируются все имеющиеся нейроны сети, т.е. для каждого из них определяется вектор входных значений, вычисляется и запоминается значение функции активации. Все эти действия выполняются методом *step* класса симулятора нейрона. Симулятор сети циклически перебирает все нейроны и вызывает этот метод.

3. Формируются состояния эффекторов. Вычисляются новые, усредненные за весь период работы сети, значения сигналов оценочных эффекторов и рецепторов «наказание/поощрение». Каждое усредненное значение v_i вычисляется по формуле:

$$v_i = (v_{i-1} * (i-1) + v) / i,$$

где v – текущее значение эффектора/рецептора, i – номер цикла работы симулятора. Усреднение позволяет сгладить влияние резких изменений значений эффекторов/рецепторов на модификацию структуры сети, возможно, выполняемую в последующих шагах работы алгоритма. Вычисляются две попарные суммы взвешенных усредненных значений рецептора «наказание» с эффектором «неудовлетворенности» (назовем такую

сумму общей оценкой «плохо») и рецептора «поощрение» с эффектором «удовлетворенности» (эта сумма далее будет называться общей оценкой «хорошо»). Веса рецепторов в начальный момент устанавливаются равными весам эффекторов и равными единице. Далее веса эффекторов в каждом цикле уменьшаются, если текущее значение «поощрения/наказания» выше, чем текущее значение «удовлетворенности/неудовлетворенности» и увеличиваются в противоположном случае. Величина изменения пропорциональна разнице соответствующих значений. Существуют минимальный (например – 0.1) и максимальный (например – 1.9) пределы величин весов, задаваемые в качестве параметров симулятора.

4. По совокупности общих оценок симулятор определяет необходимость и «масштаб» внесения изменений в нейронную сеть. Диапазон возможных значений общих оценок считается разбитым на поддиапазоны, каждому из которых соответствует определенный уровень (совокупность параметров) требуемых изменений [10]:

- А. Не требуется никаких изменений.
- В. Требуется изменение параметров отдельного нейрона (порог срабатывания, тип функция активации, коэффициенты функции активации, ...).
- С. Требуется изменение параметров существующих межнейронных связей (весов, задержек распространения сигнала, ...).
- Д. Требуется изменение графа межнейронных связей.
- Е. Требуется изменение количества нейронов и, соответственно, графа их связей.

Далее симулятор выполняет требуемые изменения сети независимо для каждого значения общих оценок «хорошо» и «плохо». Если согласно оценке «хорошо» нужно изменить параметры межнейронных связей, а согласно оценке «плохо» нужно добавить новый нейрон, то оба эти действия должны быть выполнены. Необходимо отметить, что при невозможности выполнить действия, соответствующие вычисленному поддиапазону общей оценки, осуществляется переход к действиям, соответствующим следующему поддиапазону по схеме В → С → D → E. Например, если согласно значению какой-либо оценки нужно модифицировать параметры межнейронных связей (случай С), а в сети еще нет ни одного нейрона, то в конечном итоге симулятор добавит один нейрон, т.е. выполнит действие Е. Любая выполненная модификация запоминается в качестве транзакции. После выполнения следующего цикла симуляции проверяется, привела ли эта модификация к желаемому изменению значений общих оценок (уменьшению значения «плохо» и/или увеличению значения «хорошо»). Если нет, то транзакция откатывается, т.е. внесенные изменения отменяются. Заметим, что начения границ поддиапазонов задаются в качестве параметров симулятора и могут быть в принципе изменены в процессе работы сети.

4.A В этом случае симулятор просто возвращается к шагу 1.

4.B Модификация параметров одиночного нейрона требует вначале решения задачи адекватного выбора его из множества нейронов сети для предотвращения бесконечных изменений параметров одного и того же нейрона при повторных возникновениях случая B. Для этого класс нейрона должен обеспечивать хранение номера цикла, в котором параметры каждого экземпляра последний раз модифицировались и выдачу его по запросу. Симулятор просматривает все нейроны в поисках «самого старого». Цикл этого просмотра легко может быть совмещен с шагом 2.

Заметим, что при откате транзакций восстанавливается значение ранее модифицированного параметра, но экземпляр нейрона сохраняет момент применения этого изменения. Поэтому в случае отката следующей точкой применения аналогичной модификации будет другой экземпляр нейрона. Это обеспечивает быть может очень медленное, но тем не менее – направленное движение к цели, т.е. к уменьшению той составляющей оценки «плохо», которая вырабатывается самой сетью, и, соответственно, к увеличению такой же составляющей оценки «хорошо».

Заметим также, что результатом некоторых модификаций параметров нейрона по сути может стать его удаление из сети. Например, если в результате увеличения порог срабатывания достиг «бесконечного» значения, то нейрон далее просто не нужен и будет удален вместе со всеми его связями. Поэтому в пункте 4.E описывается только добавление новых нейронов.

Далее симулятор для найденного экземпляра вызывает соответствующий метод класса нейрона и передает ему аргументы для модификации нужного параметра в нужную сторону.

4.C Модификация параметров межнейронных связей выполняется аналогичным образом. Точно так же, некоторые модификации параметров связей (например – уменьшение веса до нуля) могут приводить к их удалению. Поэтому в пункте 4.D описывается только добавление новой связи.

4.D Для добавления новой межнейронной связи должны быть найдены нейрон-источник и нейрон-приемник. В текущей версии симулятора реализуются такая процедура. Выявляется нейрон с низким порогом, но не сработавший в данном цикле. Он рассматривается как приемник для новой связи. Один из сработавших в этом цикле нейронов (в том числе – рецепторов), ранее не связанный с выбранным приемником, фиксируется в качестве источника. Создается новая связь с весом, достаточным для срабатывания приемника в следующем цикле. Этот алгоритм не препятствует возникновению обратных связей. Далее как обычно, в этих экземплярах нейронов фиксируются моменты времени. В следующем цикле возможен откат этой транзакции и последующий поиск другой пары «приемник-источник».

4.Е При добавлении нейрона кроме создания экземпляра выполняется неоднократное применение шага 4.Д для формирования нескольких входящих и нескольких исходящих связей этого нейрона. В текущей версии симулятора, во-первых, для нового нейрона всегда создается ровно одна входящая и одна исходящая связь, и во-вторых – в качестве приемника исходящей связи всегда выбирается один из эффекторов. Другими словами, симулятор будет склонен создавать многослойную сеть.

Выполнение любой модификации сети завершается возвратом к шагу 1 с переходом к следующему циклу.

Предложенные в работе алгоритмы симулятора в настоящее время тестируются с целью выявления наиболее подходящих значений его параметров. В связи с тем, что объемы вычислений, выполняемых при самообучении растущей нейронной сети, оказались весьма значительными, предполагается реализация основных функций симулятора на графическом процессоре.

Список литературы

1. Kohonen T. Self-organization and Associative Memory // Springer-Verlag, 1989.
2. Fritzke B., Wilke P. FLEXMAP – A neural network for the traveling salesman problem with linear time and space complexity // Proc. Of IJCNN-91, Singapore, 1991. – 929.
3. Shen F., Hasegawa O. An incremental network for on-line unsupervised classification and topology learning // Neural Networks. – №19. – 2006. – pp. 90-106.
4. Shen F., Ogura T., Hasegawa O. An enhanced self-organising incremental neural network for online unsupervised learning // Neural Networks. – №20. – 2007. – pp. 893-903.
5. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of statistical learning // Springer-Verlag, 2008.
6. Anokhin P.K. Biology and neurophysiology of the condition reflex and its role in adaptive behavior. Oxford, Pergamon Press, 1974.
7. Hawkins J, Blakeslee S. On Intelligence. Times Books, 2004.
8. А.А.Малявко, А.В.Гаврилов. К вопросу о создании самообучающейся и самомодифицирующейся импульсной нейронной сети в качестве модели мозга. // Труды XIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2016. – Новосибирск: НГТУ, Том 9. - С. 66-69.
9. Гаврилов А.В. Эмоции, априорные знания и дружественное поведение робота. - Труды 11-ой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008. – М.: ЛЕНАНД, 2008. –Т.1. –С.410-419.
10. Денисов А. А., Коуров В.Ю. О возможных подходах к реализации растущих импульсных нейронных сетей // Перспективные методы и средства интеллектуальных систем: Материалы Всероссийского научно-практического семинара и школы молодых ученых. – Новосибирск: НГТУ, 2015. – С. 14-15.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ В КРУГЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСЛОЙНОЙ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Аннотация: Искусственные нейронные сети позволяют решать задачи, где обычные алгоритмы и методы применять затруднительно. Они обучаются путем изменения весовых коэффициентов, связывающих отдельные нейроны, по заданной обучающей выборке, включающей в себя векторы входных значений и соответствующие им векторы, которые ожидаются на выходе из сети.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, обратная задача, ЭИТ.

SOLUTION OF AN INVERSE PROBLEM OF ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY WITH USING MULTILAYER ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

E.V. Semyonov, graduate student, semyonov@math.tsu.ru
NR TSU, Tomsk, Russia

Abstract: Artificial neural networks allow solving problems, where conventional algorithms and methods of use are difficult. They are trained by changing the weighting coefficients that bind individual neurons, for a given training set, comprising a vector of input values and corresponding vectors that are expected at the output of the network.

Key words: artificial neural network, inverse problem, EIT.

В работе рассматривается двумерная задача электроимпедансной томографии. Область исследования представлена однородным кругом радиуса R с равномерно распределенными по границе круга L электродами E_l . Математически, решаемая задача была поставлена следующим образом [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0;$$

$$\frac{\partial u(x, y)}{\partial n} = 0, (x, y) \notin E_l, l = \overline{1, L};$$

$$\left[u(x, y) + z_l \sigma \frac{\partial u(x, y)}{\partial n} \right] = U_l, (x, y) \in E_l;$$

$$\sum_{l=1}^L U_l = 0; \int_{E_l} \sigma \frac{\partial u}{\partial n} dl = I_l.$$

Здесь σ - электрическая проводимость среды, L - количество электродов на границе среды, $l = \overline{1, L}$ номер электрода, z_l - сопротивление электрода с номером l , U_l и I_l - соответственно напряжение и ток на электроде l , $u(x, y)$ - значение потенциала в точке, $\bar{n}$ - внешняя нормаль на границе области.

Постановка прямой задачи: По заданному напряжению U_l и проводимости среды $\sigma > 0$, необходимо найти ток I_l на границе области. Обучающая выборка и тестовый случай для нейронной сети рассчитывались по приближенному аналитическому решению, предложенному Евгением Демиденко в 2011 году [2].

Ниже представлена таблица результатов обучения нейронной сети для различных ее конфигураций, а также с различными параметрами скорости обучения. Ошибка сети рассчитывалась как евклидова норма ошибки работы сети, количество итераций было ограничено 1000. Указание количества нейронов в скобках последнего столбца указывает на количество нейронов в скрытом слое. Количество слоев указано без фиктивного слоя.

Таблица. Результаты решения прямой задачи.

Ошибка сети	Размерность выборки	Параметр скорости обучения	Вычисление градиента ошибки в выборке	Количество слоев нейронной сети
0,00085	50	0,001 (const)	По каждой паре	1
0,03836	20	0,001 (const)	По каждой паре	1
0,00072	50	0,001 (const)	По всей выборке	1
0,04667	20	0,001 (const)	По всей выборке	1
10^{-6}	50	Подбором*	По всей выборке	1
10^{-6}	20	0,001 (const)	По всей выборке	1
0,00834	50	0,05 (const)	По каждой паре	2 (20 нейронов)
0,00793	50	0,05 (const)	По каждой паре	2 (32 нейрона)
0,02417	50	0,05 (const)	По каждой паре	2 (10 нейронов)
1,17523	50	0,001 (const)	По всей выборке	2 (32 нейрона)
2,18448	50	Подбором*	По всей выборке	2 (32 нейрона)

*Имеется в виду метод адаптивного подбора параметра скорости обучения, когда в случае успешного направления минимизации ошибки параметр увеличивается вдвое, иначе уменьшается вдвое.

Постановка обратной задачи: По заданному напряжению U_l и току I_l на электродах, найти проводимость однородной среды $\sigma = const$.

Ниже представлены результаты обучения нейронной сети обратной задачи.

Таблица. Результаты решения обратной задачи.

Ошибка сети	Размерность выборки	Параметр скорости обучения	Вычисление градиента ошибки в выборке	Количество слоев нейронной сети
0,06840	50	0,001 (const)	По каждой паре	1
0,03240	20	0,001 (const)	По каждой паре	1
0,07389	50	0.0003 (const)	По всей выборке	1
2,53799	50	Подбором*	По всей выборке	1
0,17212	50	Подбором*	По всей выборке	2 (16 нейронов)
0,08411	50	0,001 (const)	По всей выборке	2 (8 нейронов)
0,08260	50	0,001 (const)	По каждой паре	2 (8 нейронов)
0,83274**	50	0,001 (const)	По каждой паре	2 (8 нейронов)
0,62202	30	0,001 (const)	По каждой паре	2 (8 нейронов)

**Нормировка входных значений нейронной сети в диапазоне $[-1,1]$.

Задача нахождения тока на границе определяет линейную зависимость между входными и выходными данными выборки [3]. В связи с этим задача достаточно точно решается трехслойной искусственной нейронной сетью (включая фиктивный первый слой), причем для успешного ее решения не требуется большая выборка (необходима линейная функция активации). Задача же нахождения проводимости однородной среды (обратная задача) сложнее. Здесь отсутствует линейная зависимость между данными, а обучающая выборка, при визуализации, представляет собой сложную (хоть и выпуклую) поверхность. Поэтому, для успешного решения задачи нахождения проводимости среды следует использовать большую выборку, а также многослойную сеть, приоритетно с нелинейными передаточными функциями.

Также для двумерного случая был рассмотрен еще один вариант обратной задачи, когда при фиксированной проводимости среды $\sigma = const$ подготавливалась выборка, где в качестве входных значений для сети были напряжение U_l и ток I_l на электродах, а в качестве выходного значения был вектор сопротивлений $\bar{z}$ каждого из электродов (рис. 1). Такая задача решалась несколько хуже в связи с большим числом неизвестных (ошибка порядка 10^0). Улучшить результаты удалось лишь при условии, что сеть должна была найти не вектор сопротивлений, а общее сопротивление для

всех электродов $z_1 = z_2 = \dots = z_L$ (в таком случае ошибка составила 10^{-2}). К тому же было проверено, что влияние сопротивления было значительным при значениях из интервала $[0, 1]$, тогда как значения больше единицы плохо распознавались сетью в связи с малым влиянием на решение прямой задачи и проходящий через электрод ток (рис. 2).

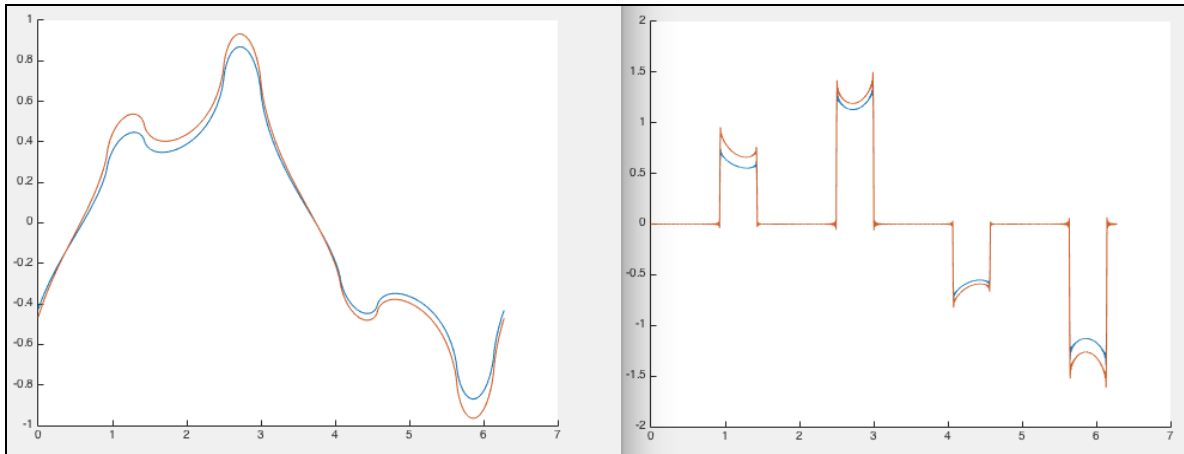


Рис.1. Сравнение решения из тестового примера (оранжевый график) и решения, полученного нейронной сетью (синий график) в поиске сопротивлений каждого электрода. Слева напряжение, справа плотность тока, в зависимости от радиан угла

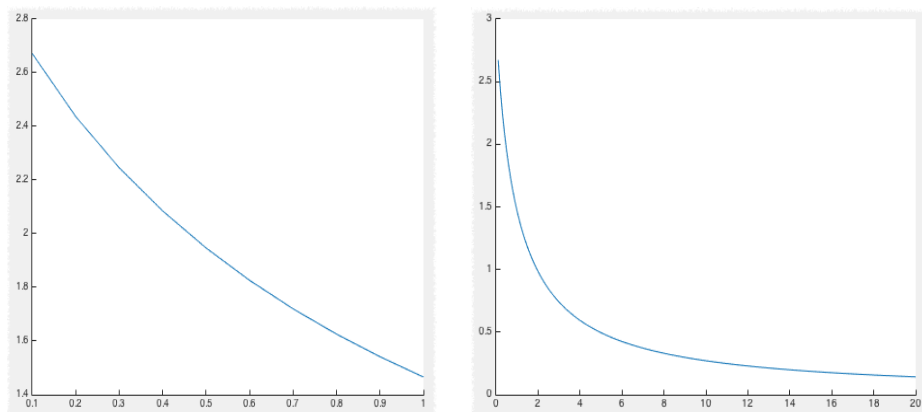


Рис.2. Зависимость тока, проходящего через электрод в зависимости от сопротивления электрода

Таким образом, при решении задачи нахождения сопротивления на электродах была введена нормировка выходных данных из интервала $[0, I_{max}]$ в интервал $[0, 1]$.

Обратная задача нахождения проводимости среды может быть решена и для неоднородной области (рис. 3), если зафиксировать проводимость на всей области, кроме некоторой подобласти с изменяемой проводимостью. Задача сводится к задаче поиска проводимости однородной области, если пренебречь проводимостью большего участка области, которая остается постоянной и не включать ее в выборку.

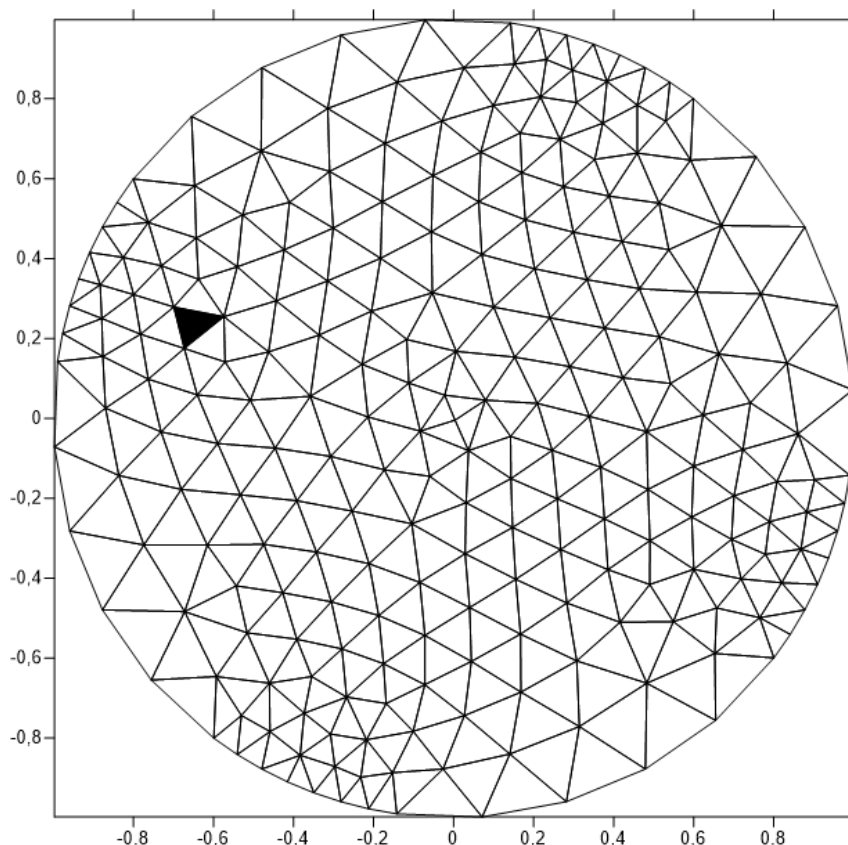


Рис.3. Схема двумерной задачи электроимпедансной томографии в круге с неоднородной областью, 4-х электродная модель

Ниже приводится поведение ошибки (рис. 4) при решении такой задачи многослойной (3 слоя, включая фиктивный) нейронной сетью с нелинейными функциями активации кроме последнего слоя (на последнем слое линейная функция). Обучающая выборка была подготовлена собственной программой, реализующей решение прямой задачи в круге методом конечного объема [1]. Случайным образом задавались напряжения на электродах и проводимость среды в выбранном конечном объеме, проводимость остальной области была

фиксирована $\sigma = 0.2$. Выборка была взята размером 100 пар $\{\bar{U}_i, \bar{I}_i, \sigma_i\}_{i=1}^{100}$, количество итераций обучения было снижено до 300, это сделано в связи с тем, что сети не удавалось найти глобальный минимум, и она застревала в локальных. Лучшее всего себя показал выбор параметра скорости обучения равного константе $\alpha = 0.0025$, а оценка ошибки была взята не отдельно по каждой паре в выборке, а по всей выборке. Ошибка работы сети составила 0.0268. Точное значение проводимости среды (отличной от всей остальной области) из тестового примера было 0.6, значение, найденное сетью: 0.605816. Однако, при выборе проводимости для тестового примера рядом с проводимостью остальной среды (0.4), результат работы сети был много хуже: 0.589547.

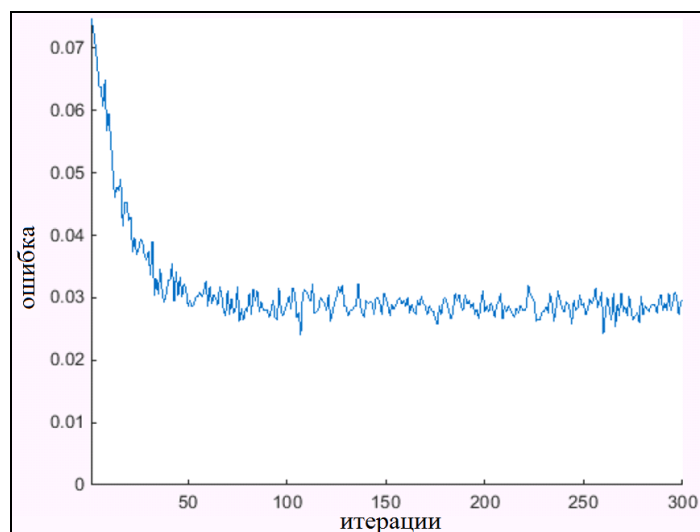


Рис.4. Поведение функции ошибки при решении обратной задачи электроимпедансной томографии в неоднородном двумерном круге

Более качественное решение подобной задачи с неоднородной средой требует более тщательного изучения теории и более точной настройки нейронной сети. В частности, не эффективным оказалось правило обратного распространения ошибки [3], в котором ошибка, проходя через всю сеть от выходного слоя к нейронам входного слоя, уменьшается до незначительной величины и не способна в достаточной степени повлиять на корректировку весовых коэффициентов нейронов первых слоев. В связи с этим планируется использовать многослойную нейронную сеть, обучаемую правилом глубокого обучения. А также необходимо будет разработать программу, основанную на одной из технологий параллельно программирования, для более эффективного результата.

Работа выполнена по Государственному Заданию Министерства образования и науки РФ, №5.628.2014/К.

Список литературы

1. Семёнов Е. В. Применение теории искусственных нейронных сетей в решении обратных задач электроимпедансной томографии: дис. ... магистра математики. – Томск, 2016. – 67 с.
2. Demidenko E., Analytic solution to homogeneous EIT problem on the 2D disk and its application of electrode contact impedances // *Physiological Measurement*. – 2011. – P. 1453-1471.
3. Семёнов Е. В. Решение обратной одномерной задачи электроимпедансной томографии с помощью нейронных сетей // Молодежная научная конференция «Все грани математики и механики»: сборник статей / под ред. А.В. Старченко. Томск: Издательский дом Томского государственного ун-та, 2015. – С. 89-96.

Секция 6

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

К ВОПРОСУ ОБ ЭТИКЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РОБОТОВ

Аннотация: В статье рассматривается проблема сосуществования будущего искусственного разума с людьми. Предлагается вместо трудно реализуемых законов робототехники А.Азимова, предназначенных для непосредственного управления поведением робота, использовать их для формирования эмоций, управляющих поведением опосредованно. Дружественное поведение робота в этом случае обеспечивается процессом его обучения, так же как моральное миролюбивое поведение человека.

Ключевые слова: искусственный интеллект, гуманоидные роботы, машинное обучение, эмоции

TOWARDS ETHICS OF INTELLIGENT ROBOTS

A.V. Gavrilov, Ph.D., docent, gavrilov@corp.nstu.ru
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: A problem of coexisting of future artificial mind with people is discussed in this paper. Instead of difficulty implemented Laws of A.Asimov providing direct control of robot's behaviour author suggests to use them for generation of emotions controlling indirectly. In this case friendly behaviour of robot is providing by corresponding learning similar to learning of moral friendly behaviour of human beings.

Key words: Artificial Intelligence, Humanoid Robots, Machine Learning, Emotions

В 2008г. автор данной статьи писал [1], что можно выделить следующие тенденции в развитии искусственного интеллекта:

1. Проникновение ИИ во все аспекты информатизации жизни — от разработки программного обеспечения до приготовления пищи и уборки на кухне. Проявлением этой тенденции является появление и разработка таких парадигм как “ubiquitous computing”, “pervasive computing” и “smart environment”;
2. Появление парадигмы «настоящего искусственного интеллекта» или универсального ИИ (Artificial General Intelligence) [3], способного

обучаться и решать любые задачи (а не определенный тип задач) подобно тому, как это делает человек;

3. Создание искусственных интеллектуальных систем (в частности, интеллектуальных роботов) с человекоподобным поведением, характеризующимся моделированием коллективного поведения, эмоций, мотивации, самообучения;
4. Появление реальных попыток создания самовоспроизводящихся роботов;
5. Появление интереса к этическим вопросам, связанным с появлением такого человекоподобного искусственного интеллекта.

В настоящее время эти тенденции сохраняются, часть из них получило существенное развитие, особенно, первые три. Примерами проникновения ИИ во все области деятельности человека являются такие разработки как Watson [3], Siri [4], «умные дома» [5], программа AlphaGo для игры в Го [6] и т.д. Разработка человекоподобного искусственного интеллекта в последнее время интенсивно развивается: по проблеме AGI (Artificial General Intelligence) ежегодно проводится одноименная международная конференция [7]. Интеллектуальные роботы получают все большее распространение в военной области [8], в сфере обслуживания [9], в индустрии развлечений, внедряются в производство в качестве промышленных роботов [10]. И особенно бурно развивается направление создания гуманоидных роботов с человекоподобным поведением и обучением. Системы управления таких роботов как правило используют технологии искусственных нейронных сетей.

Успехи в этих направлениях подогреваются относительно новыми направлениями в области искусственных нейронных сетей: глубокими нейронными сетями (deep neural networks) [11] и нейроморфными технологиями (neuromorphic technology) [12]. Эти два направления в их комбинации позволяют строить компактные аппаратные малоэнергоёмкие нейронные сети, по сложности и объёму сопоставимые с мозгом млекопитающих.

Остались две основные нерешенные проблемы: обеспечить аппаратные (нейроморфные) нейронные сети способностью к обучению в реальном времени в процессе функционирования системы (сейчас их обучение в основном производится на хост-компьютере предварительно) и наполнить их структурой и функциональностью, подобными существующим в реальном биологическом мозге. Можно ожидать, что в ближайшие десятилетия эти проблемы будут решены.

Многие эксперты говорят о том, что в ближайшие десятилетия люди будут жить среди роботов с человекоподобным искусственным интеллектом (в том числе, гуманоидных). В связи с этим, многие ученые, имеющие дело с искусственным интеллектом, начинают задумываться об опасностях, связанных с появлением человекоподобного ИИ [13, 14, 15, 16], хотя есть и

другая оптимистическая точка зрения, основанная на идее наступления технологической сингулярности [17, 18], преобразующий человека в некое другое существо. Однако, в этом случае проблема сосуществования человека (или уже киборга) с искусственным разумом не снимается. Проблема заключается в том, что человекоподобный искусственный интеллект, с одной стороны, будет обладать мотивациями и целеполаганием (являющимися следствием требований автономности и человекоподобного поведения/общения), а с другой стороны, будет иметь отличную от нашей биологической природу и обладать более быстрым и мощным интеллектом. Так что, мы не сможем прогнозировать ход его мышления и развития и то, как он будет относиться к людям. Таким образом, при разработке человекоподобного интеллекта необходимо обеспечить его дружелюбность по отношению к людям. Решение этой проблемы можно разбить на решение двух задач:

- разработка этических правил (или морали) для роботов и
- обеспечение надежного исполнения этих правил роботами.

Решением первой из этих задач, как известно, занимался в своих фантастических произведениях известный писатель-фантаст и популяризатор науки Айзек Азимов. Он в 1940-х годах [19] предложил так называемые три закона робототехники и в своем цикле рассказов о роботах рассматривал различные ситуации, в которых эти три закона оказывается затруднительно исполнить. Эти три закона выглядят следующим образом:

1. Робот не может причинить вреда человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинён вред.
2. Робот должен выполнять приказы человека в той мере, в которой это не противоречит Первому Закону.
3. Робот должен заботиться о своей безопасности в той мере, в которой это не противоречит Первому и Второму Законам.

Проблема, которая возникает при реализации этих правил поведения, заключается в том, что невозможно точно определить, что такое вред, а что такое польза для всех случаев жизни и для всех людей. Например, сервисный робот может считать, что применение антибиотиков или обезболивающих средств приносит вред, и не давать их человеку, хотя в данном конкретном случае эти средства могут быть единственно полезными. Или как обеспечить защиту человека от другого человека? При соблюдении законов Азимова это практически невозможно. Кстати, это касается и применения человеческой морали в условиях конфликтных ситуаций, например, в условиях военных действий.

В [1, 20] автором было предложено формулировать три закона робототехники в виде правил-продукций, использующих лингвистические переменные, которые робот учится распознавать на самом верхнем уровне подсистемы восприятия окружающей среды:

- 1) *Danger_for_man* – опасность для человека,
- 2) *Danger_for_myself* – опасность для себя (робота),
- 3) *Command_executed* – успешное выполнение текущей команды (процесс достижения текущей цели).

Правила выглядят так:

If *Danger_for_man* then *Negative_emotion*;

If *Danger_for_myself* and not *Danger_for_man* then *Negative_emotion*;

If not *Command_executed* and not *Danger_for_man* and not *Danger_for_myself* then *Negative_emotion*;

If *Command_executed* and not *Danger_for_man* and not *Danger_for_myself* Then *Positive_emotion*;

Эти правила-продукции генерируют одну из двух базовых эмоций - положительную или отрицательную, которые влияют на выбор действий и процесс обучения робота, являясь поощрением и наказанием для подсистем распознавания и выработки решений. При этом в процессе обучения робот учится избегать условий, при которых вырабатывается отрицательная эмоция, и стремится к таким, когда вырабатывается положительная.

Таким образом, вместо попытки непосредственного управления поведением (как в законах Азимова) предлагается опосредованное управление поведением путем поощрения/наказания посредством положительных и отрицательных эмоций (рис.).

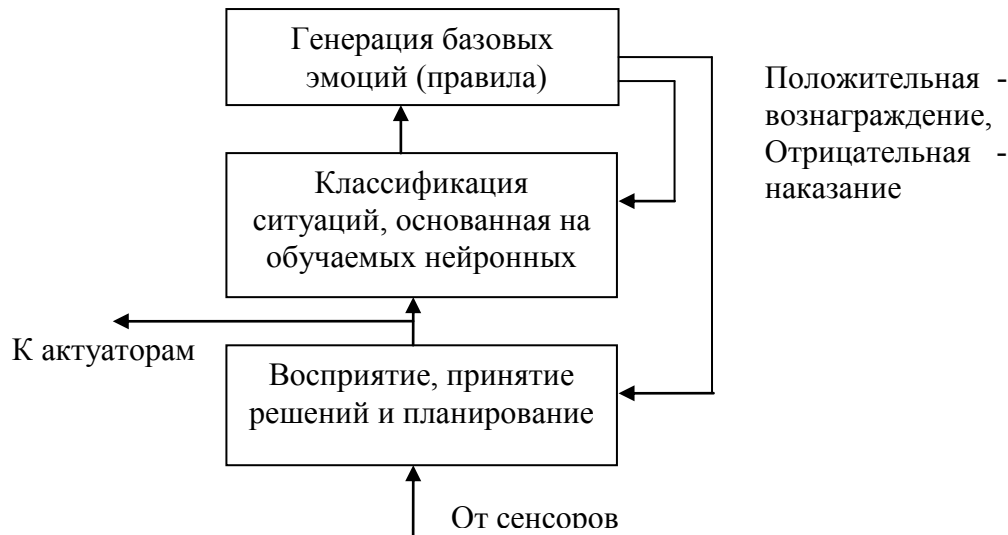


Рис. Схема использования базовых эмоций для обучения

Подходы к реализации такого обучения в рамках создания самообучающейся и самомодифицирующейся нейронной сети как модели мозга предложены в [21].

Процесс обучения такого искусственного интеллекта разбивается на два этапа:

- обучение тому, «что такое хорошо и что такое плохо», т.е. предварительная тренировка механизма выработки положительных и отрицательных эмоций,

- обучение всему остальному, т.е. решению задач, связанных с назначением робота (манипулирование объектами, движение и более сложное поведение), которое может осуществляться уже в процессе использования робота.

Следует иметь в виду, что на втором этапе в процессе использования робота продолжается дообучение механизма выработки эмоций, как побочный эффект основного обучения.

Естественно, что так же как человека можно натренировать на аморальное или преступное поведение, так и робота, управляемого эмоциями. Поэтому, единственным способом предупреждения противостояния между человеком и его творением, превосходящим его по возможностям, является улучшение и самого человека-творца, т.е. отказ от силовых методов решения социальных и прочих проблем. Есть и еще более утопический выход – отказ от создания человекоподобного искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Гаврилов А.В. Эмоции, априорные знания и дружественное поведение робота. - Труды 11-ой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008 (г.Дубна, Россия). –М.: ЛЕНАНД, 2008. –Т.1. – С.410-419.
2. Ben Goertzel, Cassio Pennachin. Artificial General Intelligence. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
3. The Era of Cognitive Systems: An Inside Look at IBM Watson and How it Works. [Электронный ресурс]: режим доступа - <http://www.redbooks.ibm.com/redpapers/pdfs/redp4955.pdf>
4. Tom Gruber. Siri: A Virtual Personal Assistant. Keynote presentation at Semantic Technologies conference (SemTech09), June 16, 2009. [Электронный ресурс] : режим доступа - <http://tomgruber.org/writing/Siri-SemTech09.pdf>
5. А.В.Гаврилов. Искусственный Домовой. - Искусственный интеллект и принятие решений, №2, 2012.- С.77-89.
6. AlphaGo - [Электронный ресурс] : режим доступа - <https://ru.wikipedia.org/wiki/AlphaGo>
7. Conference Series on Artificial General Intelligence [Электронный ресурс] : режим доступа - <http://agi-conference.org/>
8. Хрипунов С.П., Чиров Д.С., Благодарящев И.В. Военная робототехника: современные тренды и векторы развития. – М.: ООО «НБ-Медиа», 4, 2015. – С. 410-422.
9. Аналитическое исследование: мировой рынок робототехники. – НАУРР. 2016. [Электронный ресурс]: режим доступа - [http://robotforum.ru/assets/files/000_News/NAURR-Analiticheskoe-issledovanie-mirovogo-rinka-robototekhniki-\(yanvar-2016\).pdf](http://robotforum.ru/assets/files/000_News/NAURR-Analiticheskoe-issledovanie-mirovogo-rinka-robototekhniki-(yanvar-2016).pdf)

10. Smart, Collaborative Robot for Precision Tasks. [Электронный ресурс] : режим доступа - https://www.rethinkrobotics.com/wp-content/uploads/2015/11/Sawyer_Datasheet_Nov_2015_web.pdf
11. Гаврилов А.В. Deep learning (глубокое или глубинное обучение). – Материалы Всероссийского научно-практического семинара и школы молодых ученых «Перспективные методы и средства интеллектуальных систем (ПМСИС-2015)». – Новосибирск, 2015. – С. 50-59. [Электронный ресурс]: режим доступа - <http://www.insycom.ru/html/metodmat/dp.pdf>
12. Гаврилов А.В., Канглер В.М. Нейроморфные технологии: состояние и перспективы развития. – Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «Робототехника и искусственный интеллект - 2015». – Красноярск: СФУ, 2015. – С. 148-154.
13. Yudkowsky E. Creating Friendly AI 1.0: The Analysis and Design of Benevolent Goal Architectures. San Francisco, CA: The Singularity Institute, 2001.
14. Hugo de Garis. The Artilect War: Cosmists Vs. Terrans: A Bitter Controversy Concerning Whether Humanity Should Build Godlike Massively Intelligent Machines. Palm Springs, CA, 2005.
15. Баррат Дж. Последнее изобретение человечества: Искусственный интеллект и конец эры Homo Sapiens. – М.: АНФ. 2015.
16. Гаврилов А.В. Искусственный интеллект и будущее цивилизации // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 5. [Электронный ресурс] : режим доступа - <http://web.snauka.ru/issues/2015/05/50092>
17. Kurzweil R. The Singularity Is Near. N. Y.: Viking, 2005.
18. Российское трансгуманистическое движение. [Электронный ресурс] : режим доступа - <http://transhumanism-russia.ru/>
19. Азимов А. Мечты роботов. М.: Эксмо, 2004.
20. Andrey V.Gavrilov. Emotions and a priori Knowledge Representation in Artificial General Intelligence. In Proc. of Int. Conf. on Intelligent Information and Engineering Systems INFOS-2008. Varna, Bulgaria, June 23-July 03, 2008; in book: “Intelligent Technologies and Applications” of Int. Book Series “Information Science and Computing”, ITHEA, Bulgaria. - Pp. 106-110.
21. А.А.Малявко, А.В.Гаврилов. К вопросу о создании самообучающейся и самомодифицирующейся импульсной нейронной сети в качестве модели мозга. // Труды XIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2016. – Новосибирск, НГТУ, Том 9. - С. 66-69.

И.А. Грищенко, студент, ytnytn1@gmail.com
М.Е.Рублева, студент, marishka_6500@mail.ru
А.В.Чубарь, к.т.н., доцент, alexchub@mail.ru
Т.А. Шадрина, магистрант, tatockash@yandex.ru
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБОТА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ПРИВОДОМ В СРЕДЕ ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH

Аннотация: Описывается процесс создания математической модели двигателя постоянного тока LEGO MINDSTORMS NXT, а также проектирования робота с дифференциальным приводом и моделирование управления им в программной среде SimInTech.

Ключевые слова: робот, дифференциальный привод, модель, проектирование, визуальное моделирование

DESIGNING OF A ROBOT WITH DIFFERENTIAL DRIVE IN VISUALMODEING ENVIRONMENT SIMINTECH

I.A. Grishchenko, student, ytnytn1@gmail.com
М.Е.Рублева, student, marishka_6500@mail.ru
A.V.Chubar, Ph.D., Associate Professor, alexchub@mail.ru
Т.А. Shadrina, master student, tatockash@yandex.ru
Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Annotation: It describes the process of creating of mathematical model of the direct current motor LEGO MINDSTORMS NXT, as well as designing of a robot with differential drive and its control simulation in SimInTech software environment.

Key words: robot, differential drive, model, designing, visual modeling

Проектирование является определяющей в жизненном цикле изделий штучного и мелкосерийного производства. Использование интегрированных систем проектирования технических устройств позволяет повысить качество изделий и сократить сроки их разработки.

При проектировании любого робота, а так же его системы управления неизбежно приходится сталкиваться с обкаткой робота в различных условиях. Для этого можно построить тестовую модель и провести

некоторые испытания. Если робот является достаточно сложным встает вопрос: как провести испытания, потратив минимум ресурсов? Для этих целей применяют математическое моделирование.

Рассмотрим процесс проектирования робота с следующими характеристиками:

- возможность поворота на месте;
- движение прямо, назад; поворот налево, направо;
- передвижение по запрограммированной траектории;
- размеры робота не должны превышать 0.3х0.3х0.3м;
- минимальная скорость 0.2 м/с., радиус разворота – 0.15м;
- наличие программируемого контроллера.

Конструкция должна быть легко разборной, детали должны быть легко заменяемы. Предназначен для использования детьми возрастом от 10 лет в образовательных целях.

По результатам сравнения несколько конструкторов, представленных на Российском рынке: Lego Mindstorms NXT, Vex Iq Super Kit, Tetrix был выбран конструктор Lego Mindstorms NXT, так как он подходит по всем параметрам, а так же имеет наименьшую цену.

Блок NXT имеет 32-битный микроконтроллер AVR7 с 256 Кбайт FLASH памяти и 64 Кбайт RAM памяти .8-битный микроконтроллер AVR с 4 Кбайт FLASH памяти и 512 Байт RAM памяти, радиомодуль Bluetooth V 2.0; USB-порт, 3 разъема для подключения сервоприводов, 4 разъема для подключения датчиков, LCD дисплей разрешением 99х63 пикселей, динамик, разъем для 6 батареек типа AA. Внешний вид представлен на рис. 1.

Мотор имеет следующие параметры: постоянная момента $K_t = 0.31739$ Н·м, электрическая постоянная $K_e = 0.46839$ В·с/рад , электрическое сопротивление якоря $R = 6.8562$ Ом, коэффициент вязкого трения ротора $b = 1.1278 \cdot 10^{-2}$ Н·м·с/рад, инерция ротора $J = 0.842 \cdot 10^{-2}$ кг·м². Максимальное напряжение питания $V = 9В$ [1]. Внешний вид мотора представлен на рис. 2.

Для того, чтобы правильно подобрать диаметр колес, ширину колесной базы, проверить развиваемую скорость, создадим математическую модель робота. Прежде чем составлять модель, опишем, что собой представляет робот с дифференциальным приводом.

Робот с дифференциальным приводом имеет 2 мотора, закрепленных друг напротив друга, по одному на каждое колесо. Изменение направление движения достигается за счет разности скоростей вращения моторов [2]. Кинематическая модель робота и ее симуляция будет представлены в среде «SimInTech» [3]. На вход результирующей системы будет поступать напряжение, в виде одиночного ступенчатого воздействия, следовательно, будет изменяться скорость вращения колес, а значит позиция центральной точки, представленной в декартовой системе координат будет тоже изменяться (рис. 4). Прежде чем описывать кинематическую модель робота,

необходимо описать передаточную функцию двигателя постоянного тока. Для построения передаточной функции был взят двигатель от LEGO MINDSTORMS NXT. Его передаточная функция имеет следующий вид:

$\frac{k}{Ts + 1}$, где $k = \frac{K_t}{bR + K_t K_e}$, $T = \frac{RJ}{bR + K_t K_e}$. Используемые значения представлены в таблице 1.

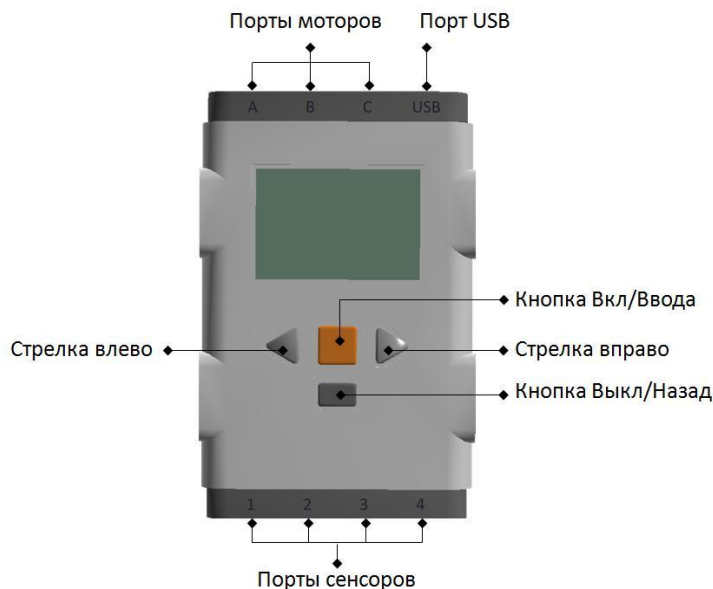


Рис. 1. Внешний вид блока



Рис. 2. Внешний вид NXT- мотора

Таблица 1 Используемые значения

Значение	Единица измерения
$K_t = 0.31739$	Н·М
$K_e = 0.46839$	V·s/rad
$R = 6.8562$	Ом
$b = 1.1278 \cdot 10^{-2}$	Н·м·s/rad
$J = 0.842 \cdot 10^{-2}$	кг·м ²

В результате математических преобразований получим следующую передаточную функцию: $\frac{2.029}{0.037s + 1}$ – апериодическое звено первого порядка. Получив передаточную функцию – соберем модель двигателя NXT в среде «SimInTech» (рис. 3) [4].

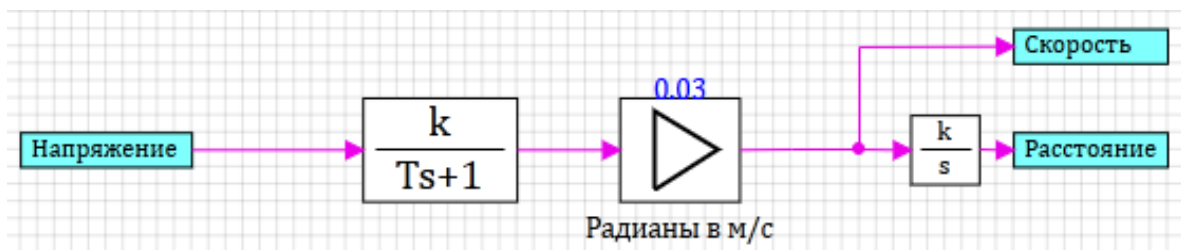


Рис. 3. Модель двигателя NXT

Опишем получившуюся модель на рис. 3. Входом данной системы является напряжение мотора, первым выходом является угловая скорость,

которая переводится в линейную, через диаметр колеса. Вторым выходом – расстояние, пройденное колесо, оно получается, путем интегрирования линейной скорости. Так как робот имеет два колеса, то будет использоваться две таких модели. Теперь мы имеем возможность контролировать скорость и/или позицию каждого колеса. Поэтому составим кинематические уравнения, чтобы смоделировать движение по траектории.

Пусть робот движется вокруг некоторой точки из-за разницы линейных скоростей колес (рис. 4). Где D – дистанция между колесами, V – скорость робота, V_r и V_l – линейная скорость правого и левого колес, R – радиус колеса, C – радиус поворота, W – угловая скорость робота.

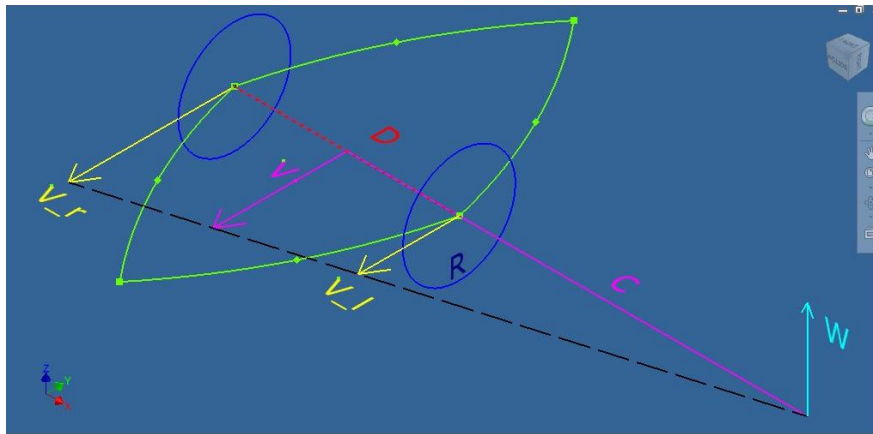


Рис. 4. Движение робота вокруг некоторой точки

Отсюда получаем: $V = \frac{V_r + V_l}{2}$, $W = \frac{V_r - V_l}{D}$. Учитывая, что линейная скорость зависит от радиуса поворота и угловой скорости, то получаем: $C = \frac{V}{W} = \frac{D}{2} \cdot \frac{V_r + V_l}{V_r - V_l}$. Далее необходимо перенести данные уравнения в среду «SimInTech» (рис. 5).

На вход подсистемы подается линейная скорость и перемещение каждого колеса, на выходе получаем координаты точки D [5].

Окончательно получаем следующие системы (рис. 6).

Для того чтобы робот удовлетворял заданным характеристиками (минимально развиваемая скорость и радиус разворота) проведем выбор таких характеристик робота, как радиус колес и ширина колесной базы, используя получившуюся математическую модель робота.

Для определения радиуса колес, проведем серию экспериментов, установив напряжение на моторах 4.5 в. и меняя в параметрах радиус колес с шагом 0.01 м.

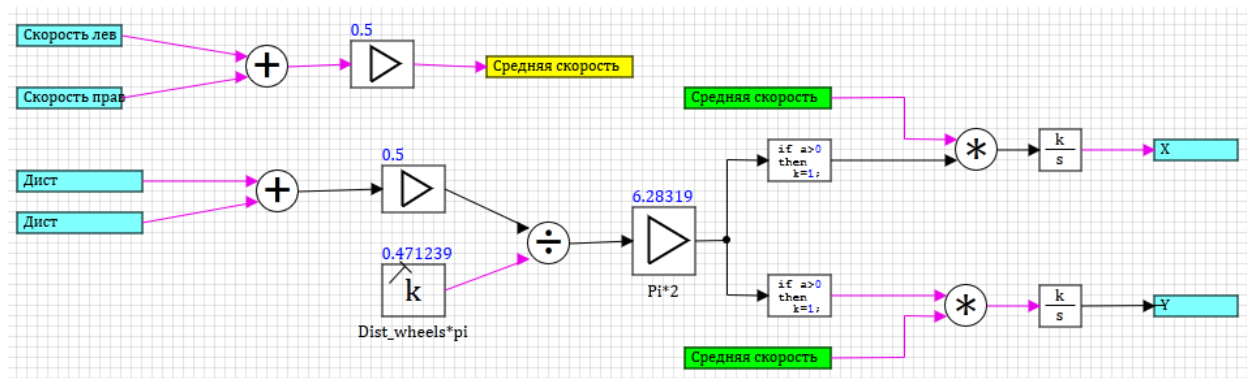


Рис. 5. Модель положения робота в пространстве

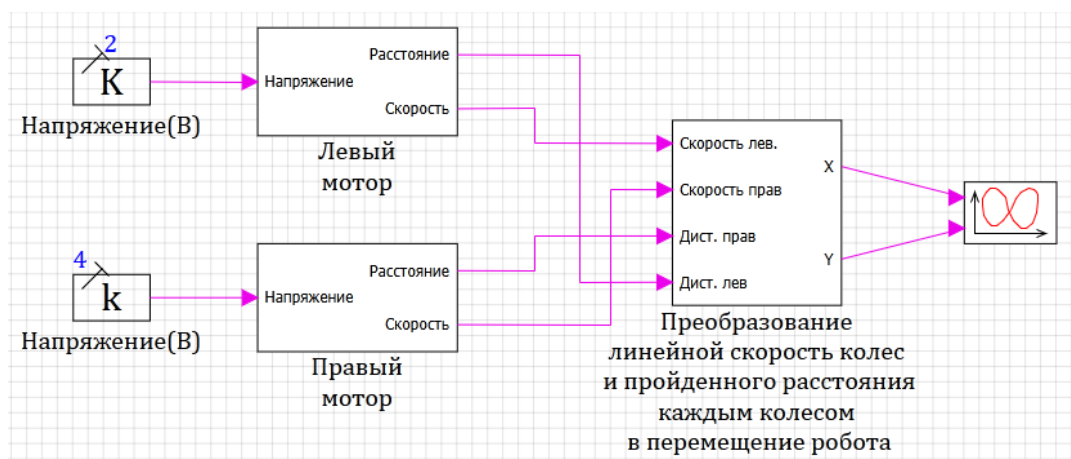


Рис. 6. Модель робота

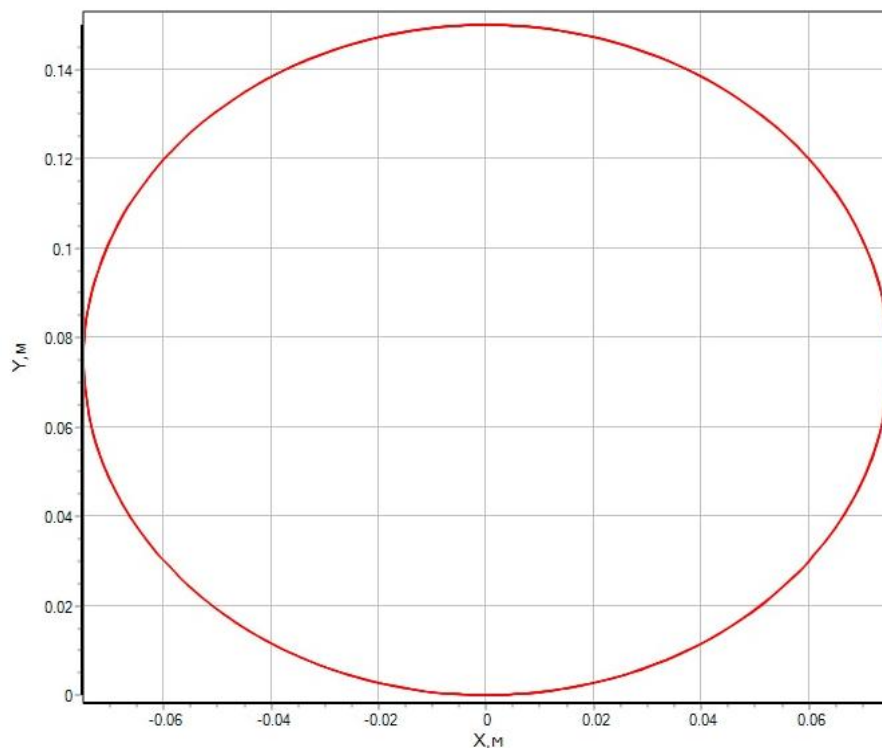


Рис. 7. Результат моделирования

Как видно из рис. 7, радиус поворота равняется 0.15 м.

Для того, чтобы определить радиус разворота, установим ширину колесной базы, равной 0.15м, а также на один из моторов подадим напряжение равное 0 В, на другой – 9 В и проведем моделирование (рис. 7).

Используя возможности математического аппарата и возможности программы визуального моделирования, были рассчитаны все необходимые параметры робота, а так же выполнена проверка некоторых характеристики. В результате чего удалось собрать робота, удовлетворяющего всем требованиям, а также избежать возможного переделывания собранного робота из-за несоответствия заявленным характеристикам.

Список литературы

1. NXT Motor // URL: http://wayback.archive.org/web/20111010092210/http://web.mac.com/ryo_watanabe/iWeb/Ryo%27s%20Holiday/NXT%20Motor.html
2. Давыдов О.И., Платонов А.К. Алгоритм управления дифференциальным приводом мобильного робота РБ-2 // Предпринты ИПМ Им. М.В. Келдыша. – №25. – 2015. – С. 1-16.
3. Грищенко И.А, Чубарь А.В. Создание математической модели робота с дифференциальным приводом // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего сборник материалов II международной научно-практической конференции: в 2-х томах. – Кемерово: ООО «Западно-Сибирский научный центр», 2016. – С. 35-37.
4. A Platform for Real-Time Control Education with LEGO MINDSTORMS //URL: <http://www.dit.upm.es/~str/papers/pdf/bradley&12a.pdf>
5. Нефедов Г.А. Стабилизация движения двухколесного робота с дифференциальным приводом по заданному пути // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана . – №4. – 2013. – С. 131-140.

Е. Н. Емельянова, начальник отдела информатизации,
соискатель ученой степени НМУ «Национальный институт образования», emelyanova@minsk.edu.by
ГУО «Минский городской институт развития образования», г. Минск, Беларусь

ТЕНДЕНЦИИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ В ПРАКТИКУ РАБОТЫ УЧРЕЖДЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СЕТЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Аннотация: В данной статье рассмотрено понятие и аспекты внедрения технологии робототехники в образовательный процесс учреждений образования как эффективного инструмента информационно-коммуникационных технологий в условиях сетевого взаимодействия. Особое внимание обращается на организационные условия занятий по образовательной робототехнике, организованных на базе лаборатории робототехники.

Ключевые слова: образовательная робототехника, сетевое взаимодействие, лаборатория робототехники

TRENDS IN THE IMPLEMENTATION OF EDUCATIONAL ROBOTICS TECHNOLOGY INTO THE PRACTICE OF EDUCATIONAL INSTITUTIONS IN TERMS OF NETWORKING

E. N. Emelyanova, head of informatization department, competitor of a scientific degree
NMU «National Institute of Education», emelyanova@minsk.edu.by
GUO «Minsk City Institute for Education Development» Minsk, Belarus

Abstract: This article discusses the concept and aspects of the introduction of robotics technology in the educational process of educational institutions as an effective tool of information-communication technologies in networking. Particular attention is drawn to the organizational conditions of employment on educational robotics, organized on the basis of the robotics lab.

Key words: educational robotics, networking, robotics laboratory

В настоящее время необходима модернизация форм, методов, технологий образовательного процесса на основе стратегий проблемно-исследовательского, активного обучения. В связи с этим необходимо внедрение новых направлений и технологий обучения. Такой технологией может стать образовательная робототехника как новый эффективный инструмент информационно-коммуникационных технологий (далее – ИКТ) подготовки обучающихся к современным реалиям жизни и повышения уровня их информационно-коммуникационной компетентности.

Под образовательной робототехникой понимается технология, в которой интегрируются знания по учебным предметам: математика, информатика, физика, черчение, способствующая формированию навыков индивидуальной, коллективной проектной и учебно-исследовательской деятельности, повышению мотивации учащихся к изучению предметов естественно-математического цикла.

Актуальность проблемы применения технологии образовательной робототехники субъектами образовательного процесса в условиях учреждения образования обусловлена также общегосударственной потребностью в развитии инженерных и конструкторских кадров. В настоящее время эта тема еще недостаточно исследована и раскрыта белорусскими учеными. Немногочисленны и разработки в данном направлении среди российских ученых (А.П. Алексеев, Л.Г. Белиовская, А.Н. Боголюбов, А.В. Литвин, А.С. Филиппов, В.Н. Халамов и др.). Среди зарубежных авторов можно выделить работы D. Alimisis, U.M. Bers, A. Carberry, B. Erwin, T. Ford, N. Perova, Ch. Rogers, C. Rogers, D.H. Jonassen и др.

Йонассен определяет данное понятие как технологию разработки и изменения учащимися модели робота на основе компьютерных обучающих сред, что способствует формированию критического мышления и более высокого порядка обучения [5]. Резник и Сильверман предложили рассматривать робототехнику как технологию, которая вовлекает детей в конструирование моделей, поощряет и поддерживает их, чтобы изучить идеи, лежащие в основе этих конструкций [9]. Существуют эмпирические доказательства того, что образовательная робототехника, как инструментальное средство выступает в качестве когнитивных усилителей, интеллектуальных партнеров, реорганизации и инструментов.

В большей степени исследователи уделяют внимание организации обучения по образовательной робототехнике обучающихся в рамках дополнительного образования детей и молодежи. В настоящее время вопросы внедрения технологии робототехники в образовательный процесс, в том числе по учебному предмету «Информатика», в Беларуси находятся на начальной стадии изучения и описания способов реализации.

Изучение основ робототехники может быть организовано на первой, второй ступенях получения общего среднего образования как в рамках

дополнительного образования детей и молодежи, внеурочной деятельности, так и в преподавании учебных дисциплин в соответствии с требованиями учебной программы. В качестве субъектов образовательного процесса по робототехнике могут выступить обучающиеся, родители (законные представители) несовершеннолетних обучающихся, педагогические работники учреждений образования. Данная тематика соответствует приоритетным направлениям в нормативных правовых актах Республики Беларусь. Основу обучения составляет разработка и создание моделей из конструктора, программирование созданной модели в объектно-ориентированной среде.

Начальный этап обучения включает изучение учащимися объектов живой и неживой природы, по которым впоследствии создаётся модель посредством использования средств информационно-коммуникационных технологий: мультимедийных презентаций, учебных видеофильмов и т.п. Этот этап предполагает сетевое взаимодействие учащихся с учителями, сверстниками с использованием программ-мессенджеров, а также поиск информации в сети Интернет. Особое внимание уделяется координации педагогом и родителями деятельности учащихся, в большей мере учащихся первой ступени получения общего среднего образования.

Второй этап предполагает изучение конструктивных элементов конструктора, разработку модели в воображении учащегося, обдумывание этапов ее конструирования.

Третий этап основан непосредственно на создании обучающимися модели роботизированных устройств. Благодаря наличию мелких деталей в конструкторе, у учащихся развивается мелкая моторика кистей рук, что способствует повышению активности головного мозга.

Следующий этап характеризуется изучением инструментов среды программирования, используемой для составления программы, на основе которой модель, благодаря наличию мотора, датчиков, usb-коннектора, приводится в движение.

Заключительной стадией является защита обучающимися сконструированной модели, что способствует развитию навыков публичного выступления.

В качестве конструктивного инструментального средства, образовательная робототехника способствует целостному, горизонтальному внедрению ИКТ в дидактический процесс.

В течение всего процесса создания модели роботизированной системы, написания, загрузки и выполнения соответствующей программы, учащиеся думают об исследуемой проблеме, разрабатывают собственные значимые проекты, управляют объектами, осуществляют сотрудничество с педагогом, своими сверстниками. Наиболее важным фактором является то, что учащиеся используют свои идеи, свой собственный способ понимания и согласно

этому представляют собственные знания. Использование робототехники способствует вовлечению учащегося в активную деятельность по конструированию и моделированию объекта и решения проблемных ситуаций, необходимых для выполнения поставленной задачи. Образовательная робототехника также способствует формированию алгоритмического мышления у учащихся, навыков программирования и определения взаимодействия созданной модели с составленной на компьютере программой, с помощью которой модель приводится в движение.

Использование робототехники на основе проектной деятельности предполагает осознанную деятельность и содержательное обучение, решение конструктивных и аутентичных задач, осуществления сотрудничества и формирования рефлексивного мышления.

Вышеуказанные доводы подтверждаются эмпирическими данными о положительном вкладе образовательной робототехники в приобретении технических навыков и результатов обучения в различных дисциплинах и образовательных ступенях [2, 3, 4].

На сегодняшний день образование предполагает необходимость перехода от образовательных инновационных технологий первого поколения (мультимедийное сопровождение лекций) и технологий второго поколения (дистанционные формы обучения) к новым информационным технологиям третьего поколения посредством телекоммуникационных (сетевых, Интернет) систем. В связи с этим важной составляющей внедрения технологии робототехники в практику учреждений образования становится возникновение потребности в необходимости организации сетевого взаимодействия с использованием ИКТ, что способствует развитию компетенций обучающихся и удовлетворения их образовательных потребностей.

Адамский А.И. определяет сетевое взаимодействие как систему связей, позволяющих разработать, апробировать и предложить профессиональному сообществу и обществу в целом инновационные модели содержания образования, экономики образования, управления системой образования и образовательной политики. Автор дает толкование этого термина как способа деятельности по совместному использованию информационных, инновационных, методических, кадровых ресурсов [1].

Зубарева Т.А. под сетевым взаимодействием понимает согласование действий субъектов сети для достижения общих целей инновационного развития. Сетевое взаимодействие возникает при условии совместной коллективной распределенной деятельности, включающей совокупность отношений между всеми субъектами учреждений образования [6].

Пинский А.А., Каспржак А.Г., Митрофанов К.Г. выделяют термин «сетевое взаимодействие» как совместную деятельность, которая

обеспечивает обучающемуся возможность осваивать образовательную программу [7].

Организация образовательного процесса на основе технологии робототехники в условиях интерактивного взаимодействия имеет ряд особенностей, среди которых можно выделить создание необходимых условий для развития индивидуальных способностей обучающихся, наличие активных форм обучения и обеспечение равноценного доступа всех категорий обучающихся к усвоению знаний, формированию умений и навыков в сфере робототехники. Сетевое взаимодействие учреждений образования осуществляется через систему официальных ресурсов, электронной почты, программ-мессенджеров, тематических сайтов, облачных и мобильных технологий, систем дистанционного обучения.

В условиях сетевого взаимодействия образовательная робототехника является перспективной технологией организации образовательного процесса на новом, высококачественном уровне. Данная технология базируется на использовании технологических наборов с возможностью программирования сконструированных обучающимися моделей, в качестве которой выступают объекты живой и неживой природы.

Немаловажным моментом становится проведение занятий по образовательной робототехнике на базе лаборатории робототехники – центре, концентрирующем новейшие достижения в области развития робототехники, способном создать условия для подготовки обучающихся по данному направлению. Лаборатория робототехники может быть создана на базе учреждений образования, в том числе ресурсных центров информационных технологий, функционирующих в городе Минске. Деятельность такой лаборатории может осуществляться с применением линейки технологических наборов датской компании LEGO в направлении «Education», такими сериями, как Duplo, WeDo, E-lab, Mindstorms, а также отдельными моделями для обучения приемам наблюдения, технического обоснования, прогнозирования и оценки результатов деятельности. Такая лаборатория представляет для обучающихся новую инновационную среду: осуществление взаимодействия на высоком уровне, соединение теоретического и практического материала, создание мотивирующей творческой сферы для реализации идей. Немаловажным является то, что применение образовательной робототехники, как инновационной технологии, на занятиях в условиях лаборатории робототехники обеспечивает равный доступ обучающихся к современным образовательным технологиям.

Особое внимание при организации занятий по образовательной робототехнике следует уделить непрерывности и преемственности обучения: первая ступень получения общего среднего образования – вторая ступень получения общего среднего образования – при необходимости – третья

ступень получения общего среднего образования. Опыт организации лаборатории робототехники имеется в ГУО «Минский городской институт развития образования». На базе лаборатории проходят обучение в сфере робототехники педагоги и учащиеся учреждений образования г. Минска (рис. 1).

Обучение основам робототехники в условиях сетевого методического взаимодействия учреждений образования целесообразно осуществлять посредством использования педагогической технологии «обучение в сотрудничестве», которая разработана тремя группами американских педагогов университета Джона Хопкинса (Р.Славин), университета штата Миннесота (Роджерс Джонсон и Дэвид Джонсон), группой Дж. Аронсона, университет штата Калифорния. В отличие от традиционных форм совместной групповой работы на занятиях по робототехнике, данная технология характеризуется следующими аспектами: взаимодействием всех членов сообщества; ответственностью каждого члена сообщества за личные успехи и успехи своих товарищей; совместной творческой, учебно-познавательной, аналитической деятельности обучающихся в сообществе; социализацией деятельности обучающихся в сообществе; общей оценкой деятельности сообщества [8].

Поскольку сетевое взаимодействие базируется на организации деятельности по коллективному применению учебных, информационных, инновационных ресурсов, зачастую существует необходимость обеспечить обучающемуся возможность усвоения знаний в сфере робототехники с использованием ресурсов двух и более учреждений. Исходя из этого использование сетевого взаимодействия учреждений образования между собой и организация сетевых сообществ в сфере образовательной робототехники становится объективно разумным решением. При этом создаются необходимые условия для развития обучающегося, в том числе одаренного, и повышения его мотивации. Общение в сети становится сотворчеством на качественно новом уровне и позволяет раскрыть наилучшие качества личности учащихся, постоянно самосовершенствоваться, изучать в интерактивном режиме учебные материалы по образовательной робототехнике, осуществлять обмен информацией и принимать участие в обсуждении в контексте изучаемой проблемы.

Таким образом, внедрение технологии образовательной робототехники в условиях сетевого взаимодействия учреждений образования способствует выработке новых активных методов и форм для использования в образовательном процессе, коллективных норм поведения, инновационной образовательной практики, переходу на кластерную модель развития, формированию учебных сетевых сообществ на базе лабораторий робототехники, повышению мотивации обучающихся, и как следствие,

качества организации образовательного процесса, обновление содержания в целом образования.

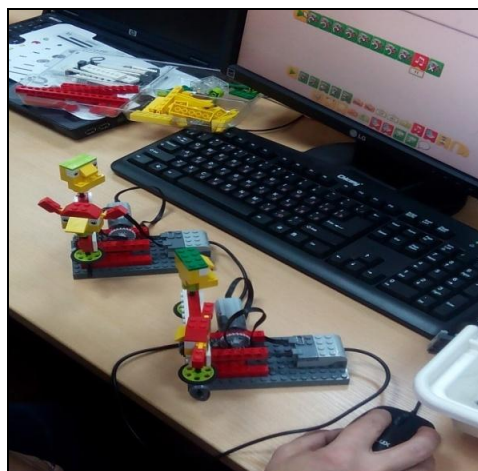


Рис. 1. Занятия на базе лаборатории робототехники ГУО «Минский городской институт развития образования»

Список литературы

1. Адамский А. И. Организация сетевого взаимодействия общеобразовательных учреждений, внедряющих инновационные образовательные программы, принимающих участие в конкурсе на государственную поддержку. – М. : Эврика. – 2006.
2. Alimisis D., Karatrantou A., Tachos N. Technical school students design and develop robotic gear-based constructions for the transmission of motion. – Warsaw, 2005. – 189 p.
3. Bers M., Ponte I., Juelich C., Viera A., Schenker J. Teachers as Designers: Integrating Robotics in Early Childhood Education Information Technology in Childhood Education Annual. – AACE, VA, 2002. – 338 p.
4. Erwin B., Cyr M., Rogers C. LEGO Engineer and RoboLab: Teaching Engineering with LabVIEW from Kindergarten to Graduate School // International Journal of Engineering Education. – 2000. – № 16 (3). – P. 181-192.
5. Jonassen D.H. Computers as mindtools for schools. – Prentice Hall, 2006. – 253 p.
6. Зубарева Т. А. Эффективность модели сетевого открытого взаимодействия образовательных учреждений как ресурс инновационного развития // Мир науки, культуры, образования. – 2009. – № 5. – С. 178-184.
7. Пинский А. А., Каспржак А. Г., Митрофанов К. Г. Рекомендации по организации сетевого взаимодействия образовательных учреждений (организаций) при введении профильного обучения учащихся на старшей ступени общего образования // Профильное обучение. Часть 1. Тематическое приложение к журналу «Вестник образования». – 2004. – № 4. – С. 39-55.
8. Полат Е. С. Обучение в сотрудничестве // Иностранные языки в школе. – 2000. – №1. – С. 4-11.
9. Some Reflections on Designing Construction Kits for Kids [Electronic resource] : papers from the Proceedings of Interaction Design and Children conference, Boulder, 2005. – Mode of access: <http://llk.media.mit.edu/papers/IDC-2005.pdf>. – Date of access: 14.11.2016.

СТРУКТУРА ИНТЕЛЛЕКТА ПО ГИЛФОРДУ

Аннотация: в статье описана структура интеллекта по Д.П. Гилфорду. Отмечены главные способности и отличия человеческого интеллекта от машинного.

Ключевые слова: интеллект, искусственный интеллект, структура

INTELLIGENCE STRUCTURE BY D.P. GILFORD

N.A. Kuzmina, student, nadezhda_kuzmina_80@mail.ru
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

Abstract: The article describes the structure of intelligence by Gilford D.P. Ability to identify the main differences between the human intellect and the machinery.

Keywords: intelligence, Artificial intelligence, structure

Проблема создания искусственного интеллекта на сегодняшний день состоит в том, чтобы разработать такой интеллект, который был бы похож на человеческий – умеющий мыслить и создавать понятия. Долгое время ведутся поиски возможности построения искусственного интеллекта: моделируются разные объекты, обладающие теми или иными свойствами человеческого интеллекта.

Бесспорно то, что компьютеры стали необходимостью в любой сфере деятельности человека. Тем самым, необходимо отметить некоторые причины, побудившие развитие исследований в области искусственного интеллекта:

1) Приблизить компьютеры к непрограммирующему пользователю, сделать общение с ним столь доступным, чтобы научиться этому при желании мог каждый человек без особых усилий.

2) Мы нуждаемся в средствах передачи информации, живя в информационном обществе. В связи с этим вычислительные машины стали объединяться в национальные и транснациональные сети для распространения информации по всему миру. Рождаются новые

информационные технологии, в создании которых имеют значение не только результаты развития вычислительной техники и сетей связи, но и достижения искусственного интеллекта. Без них невозможна формализация и передача знаний, манипулирование знаниями и доступ к ним.

3) Развитие технологии, а вместе с тем промышленности и сельского хозяйства, влечет за собой повышенные требования к технологическим процессам, условиям работы человека. Таким образом, появление роботизированной техники способно избавить от многих лишних производственных затрат. Однако, для того чтобы полностью заменить человека в решении сложных производственных задач, машина должна обладать достаточно высоким уровнем интеллекта. Прежде всего, это задачи зрительного восприятия, планирования целесообразного поведения, овладение навыками [1].

Виды информации, с которыми работает интеллект очень разнообразны, но все же их можно классифицировать и разделить по типам. Наиболее фундаментальным, с которого начиналось научное исследование интеллекта, считается *психометрический подход*, в русле которого сформировались факторные модели интеллекта. Все модели объединяет общий методологический подход. В них выделяются разные способности (факторы) и с помощью определенной математической процедуры (факторного анализа) исследуется взаимозависимость между этими факторами. Есть модели одноуровневые, предполагающие, что каждый фактор независим от прочих факторов есть модель иерархическая или многоуровневая. Наибольшую известность в психологии и в области прикладного использования данных психологии получили наибольшую известность факторные модели Ч.Спирмена, Л.Терстоуна, Дж.Гилфорда и Р.Б.Кэттелла. Самой «многофакторной» иерархической моделью интеллекта является модель, предложенная Дж.Гилфордом.

Проведем основное различие не только по противопоставлению вербальной и невербальной информации. По утверждению психолога Джоя Поля Гилфорда, при анализировании каких-либо изысканий необходимо рассматривать не только вербальную и не вербальную инфомрацию, но и еще одну, третью, категорию факторов, которая представлена тестовыми заданиями, состоящими из чисел и символов. Эта категория будет, независимой, параллельной факторам в образном и вербальном наборах соответственно. Ничто не связывает, по его мнению, вместе эти три набора. И, поэтому, за исключением того факта, что все они являются интеллектуальными способностями, нет больше никаких общих факторов, которые бы связывали вместе представителей этих наборов [2]. Поэтому невозможно построить на этой основе любую иерархическую модель. Параллельные факторы не могут быть выстроены по иерархии. Таким образом, эти три независимые, параллельные наборы состоят из трех

значащих категорий, которые называются образной (фигуративной), символической и *семантической* категорией. Структура интеллекта, по мнению Д. П. Гилфорда, приведена на рисунке.

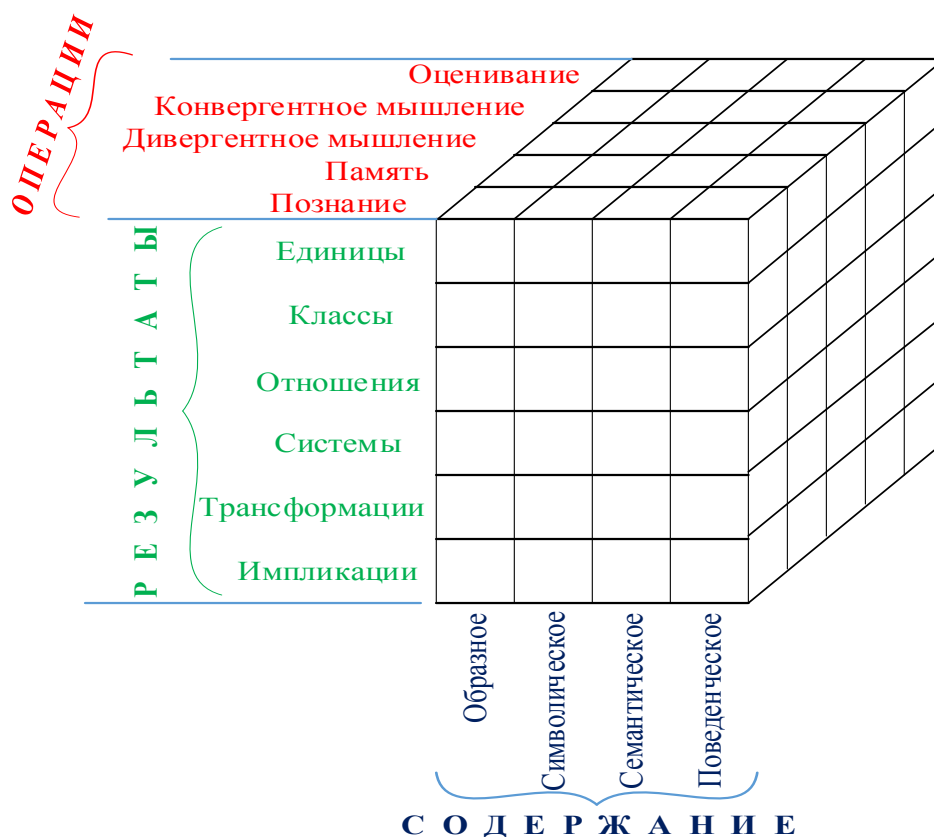


Рис. Структура интеллекта по Д.П.Гилфорду

Порядок по каждому измерению категорий, обусловлен логическими причинами, но без какой-либо строгой зависимости. Размещение символической информации между выраженной в образах и смысловыми символами, тесно связаны по отношению к этим двум типам информации. Символы, в основном, являются образными, но они становятся символами только тогда, когда они представляют, символизируют любой из семантической категории. Конечно, они могут также предоставлять информацию из других категорий.

Информация в электронные базы знаний вкладывается человеком-экспертом – а, следовательно, уже так или иначе - находится под влиянием оператора. Вычислительная машина не сама накопила эти знания. Ей предоставили конечный результат.

Именно это и отличает знания в искусственной интеллектуальной системе от данных – то есть они определяют ту грань, за которой данные превращаются в знания, а базы данных – в базы знаний. Вместе с тем такие черты, как внутренняя интерпретируемость, структурированность, связность, семантическая метрика и активность присущи любым более-менее крупным

блокам человеческих знаний и в этом смысле знания в компьютерной системе можно рассматривать как модель того или иного фрагмента человеческого знания [2].

Разбираясь в сущности человеческого интеллекта можно выделить ряд присущих ему базовых способностей.

Первая способность присущая интеллекту — это способность к обучению. Личность невозможно представить без мыслительной деятельности: стремление к обучению в данном случае продиктовано внутренней потребностью человека к самореализации.

Вторая способность человеческого интеллекта — это возможность оперировать абстракциями. Ученые, мыслители, философы используют в своей деятельности научные понятия и определения. Да и не только они: даже студенты должны учиться понимать язык абстракций и свободно им оперировать.

Третья неотъемлемая часть интеллекта — это способность приспосабливаться к условиям окружающей среды [3].

Разница между человеком и машиной, прежде всего, в том, что число элементов человеческого тела по порядку величин во много раз больше, чем у машины. Согласно современных научных данных человеческий мозг содержит около 240 основных «вычислительных» узлов нейронов, которые соединяют около 250 синапсов соединений. Отсюда непосредственно следует, что организация элементов в организме настолько сложна, что с помощью наших современных логических средств мы не можем освоить эту сложность.

Преимущество человека состоит в его гибкости, в его умении работать с неточными идеями, хотя создание нейронных сетей и было задумано для имитации структуры нейронов человеческого мозга и работы с зашумленной информацией. Поэтому модель Д.П. Гилфорда не потеряла актуальность и может быть взята за основу сохадения искусственного интеллекта.

Список литературы

1. Тьюринг А. Могут ли машины думать? [Электронный ресурс]: режим доступа - <http://humanities.edu.ru/db/msg/27602>.
2. Люгер Дж. Ф. Искусственный Интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. — М: Вильямс, 2003. — 864 с.
3. Козубовский В. М. Общая психология: личность. — Минск: Амалфея, 2005. — 448 с.

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ С ОПЕРАТОРАМИ ОБОРУДОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация: Рассмотрены общие принципы обучения операторов оборудования специального назначения, выделены особенности обучения с помощью компьютерных тренажеров, отмечена необходимость протоколирования и комплексного анализа учебной траектории.

Ключевые слова: интеллектуальные автоматизированные обучающие системы, компьютерное обучение, подготовка операторов, оборудование специального назначения, протокол траектории обучения

FEATURES OF INTERACTION WITH THE OPERATOR TRAINING SYSTEMS EQUIPMENT FOR SPECIAL PURPOSES

М.А. Rogozhnikova, cayana102@mail.ru
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

Abstract: Considered the general principles of the training of operators of special-purpose machinery, detailed features of training with the help of computer simulators, noted the need to log and complex analysis educational trajectory.

Key words: intelligent automated education systems, computer-aided instruction, operators training, special-purpose machinery, log educational trajectory/

Обучение и тренировка операторов, работающих на оборудовании специального назначения, является одной из немаловажных задач многих современных предприятий. Под оборудованием специального назначения понимаются технические средства, выпускаемые по специальным заказам военных министерств и ведомств и отличающиеся по своему функциональному назначению. Как правило, это сложное специализированное авиационное, медицинское оборудование, а также техника для атомной промышленности, спутникостроения и т.д. Особенностью оборудования специального назначения являются повышенные требования к надежности работы аппаратуры, более плотной ее

компоновкой, более жесткими условиями эксплуатации и повышенными требованиями к персоналу, который обслуживает указанное оборудование.

Успешность и безопасность работы оператора зависит от того, насколько хорошо он прошел обучение и научился работать как в обычных, так и в нештатных ситуациях. На сегодняшний день для обучения операторов на практике применяются различные виды обучения: лекции, инструктажи, тренинги, обучение с применением компьютерных тренажеров и имитаторов, а также обучение непосредственно на оборудовании специального назначения, с которым связаны трудовые обязанности оператора. На лекциях и инструктажах операторы получают необходимый объем теоретических знаний, практические навыки могут быть приобретены во время стажировок на реальном оборудовании, а также с помощью компьютерных тренажеров. Компьютерные тренажеры имитируют различные ситуации управления каким-либо процессом, аппаратом, транспортным средством или другим механизмом и позволяют повысить качество обучения оператора[1]. К тому же если оператор длительное время не занимается работой на оборудовании специального назначения, компьютерные тренажеры позволят быстро восстановить забытые навыки и восполнить пробелы, появившиеся за время перерыва в работе.

Подготовка персонала с помощью компьютерных тренажеров применяется все чаще в связи с развитием новых технологий и появлением сложной высокоинтеллектуальной техники, так как это требует качественной подготовки специалистов, работающих с современным оборудованием специального назначения. Компьютерные тренажеры позволяют получить практические навыки в условиях, максимально приближенных к работе в реальных условиях, научиться управлять оборудованием специального назначения, ориентироваться в его конструкционных особенностях, а также быстро принимать решения в нештатных ситуациях. Таким образом, компьютерные тренажеры решают задачу комплексного теоретического и практического обучения операторов оборудования специального назначения и имеют ряд достоинств, среди которых можно отметить высокую степень наглядности отображения реальных процессов, возможность проведения различных натурных экспериментов, возможность доведения до автоматизма профессиональных навыков оператора.

Среди недостатков современных компьютерных тренажеров можно отметить высокую стоимость лабораторного оборудования. К тому же они имеют ряд ограничений, которые зависят от выбора метода организации предметных знаний. В основе большинства компьютерных тренажеров лежит электронный учебный курс, «бумажный» учебник, анимированный конструктор или мнемосхема. Как правило, тренажеры ориентированы на стандартное содержание учебного курса, имеют строгую структуру,

обращение к последующей структурной единице невозможно без изучения предыдущей.

Практические навыки обучающиеся с помощью компьютерных тренажеров получают, выполняя разнообразные ситуационные сценарии различного уровня сложности. Обучение начинается с моделирования простой ситуации, в процессе освоения тренировочной программы сложность нарастает. Более сложные задания предлагаются либо с переходом на следующий уровень обучения, предусмотренный компьютерным тренажером, либо предлагаются преподавателем (наставником, тьютором). Как правило, подготовка оператора проходит три стадии: обучение (теоретическое и практическое), тренировка и проверка знаний и навыков. Для оценки степени подготовки оператора к самостоятельной работе при обучении с таким компьютерным тренажером требуется преподаватель, который следит за тем, насколько быстро и правильно будущий оператор выполняет задания на учебном тренажере, помогает исправить допускаемые ошибки, выставляет оценку за обучение и делает вывод о готовности обучаемого оператора к работе.

На основе анализа современных компьютерных тренажеров и автоматизированных обучающих систем были выделены следующие особенности взаимодействия операторов оборудования специального назначения с обучающими системами:

1) В обучающей системе должны быть предусмотрены условия обучения, максимально приближенные к реальным условиям работы, но безопасным для оператора и для техники.

2) Обучающие системы и тренажеры должны учитывать специфику отрасли, легко тиражироваться, быть доступными по стоимости и иметь возможность использоваться обучающимися без отрыва от производства.

3) Особое внимание должно уделяться практическому обучению: акцент делается на отработку действий оператора при нештатных ситуациях, которые могут возникнуть при работе.

4) Обучающая система должна обеспечить приобретение и поддержание высокого уровня знаний и навыков работы с технически сложным оборудованием.

Учитывая особенности обучения операторов, следует обратить внимание на компьютерные тренажеры, в основе которых лежит интеллектуальная автоматизированная обучающая система. Такая интеллектуальная обучающая система должна выполнять функции наставника почти так же разумно, как это делает человек, моделировать процесс обучения, автоматически подбирать наиболее рациональную стратегию обучения для каждого обучаемого оператора в зависимости от поставленной задачи, а также производить автоматизированный учет информации о процессе обучения [2,3].

Одним из предпочтительных свойств интеллектуальной автоматизированной обучающей системы является возможность протоколирования траектории обучения каждого учащегося. Это необходимо для того, чтобы интеллектуальная обучающая система могла качественно управлять учебным процессом, формируя траекторию обучения индивидуально для каждого обучаемого, при этом давая ему возможность освоить все необходимые навыки. Управление учебным процессом подразумевает формирование индивидуального для каждого обучающегося учебного курса, причем интеллектуальная обучающая система должна самостоятельно адаптировать состав и подачу учебного материала, уровень его сложности с учетом его (обучающегося) индивидуальных особенностей и навыков, которыми уже обладает обучаемый и которые должен получить в результате обучения.

В случае необходимости оценить, в какой точке учебной траектории в данный момент времени находится обучающийся с помощью интеллектуальной автоматизированной обучающей системы оператор, преподавателю достаточно будет просмотреть протокол текущей учебной ситуации. Анализ текущей учебной ситуации в процессе обучения позволит преподавателю проанализировать текущий уровень освоения материала и полученных практических навыков, показатели динамики овладения учебным материалом и сделать вывод о том, насколько быстро оператор изучает теоретический материал, как часто возвращается к уже изученному и справочному материалу, как долго решает поставленные перед ним практические задачи, какие методы работы использует при решении сложных задач и т.п.

Таким образом, можно говорить о том, что разработка функции протоколирования и анализа траектории обучения позволит сделать обучение навыкам работы с оборудованием специального назначения с помощью интеллектуальной автоматизированной обучающей системы более быстрым и результативным.

Список литературы

1. Захарова Н.А., Михайлова О.В. Компьютерный тренажер для обучения операторов технологических процессов [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.nauchforum.ru/en/node/1231>.
2. Углев В.А. Специфика подготовки операторов на базе модели ориентированных автоматизированных обучающих систем // Вопросы современной науки и практики. – Университет им. В.И. Вернадского. – №4(48). – 2013. – С. 54-58.
3. Клюкин В.Э. Web-ориентированные интеллектуальные обучающие системы на основе нечеткого деятельностного подхода в обучении // Наука и образование. – М.: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 445-476.

СОЦИОНИКА ДЛЯ РОБОТОВ: ПРОТОТИП МОДЕЛИ

Аннотация: Рассматривается задача организации обучения роботов коммуникации с людьми и между собой. Используется фундаментальная триада информатики «Задача + Программа + Исполнитель». Дается обоснование использования функций белков в клетках как аналога когнитивных процессов. Соционика использована в качестве прототипа универсальной модели субъекта для решаемой задачи.

Ключевые слова: модели субъекта, социотипы, когнитивный базис, адекватность базиса задаче, триада информатики, биологическая метафора.

TYPEWATCHING FOR ROBOTS: PROTOTYPE OF THE MODEL

V.A. Filimonov, Ph.D., professor, filimonov-v-a @yandex.ru
Sobolev Institute of Mathematics of SB RAS, Omsk Dep., Omsk, Russia

Abstract: The task of the organization of training of robots for communication with people and among themselves is considered. The fundamental triad of informatics "the Task + the Program + the Performer" is used. Justification of use of functions of proteins in cages as analog of cognitive processes is given. The TypeWatching is used as a prototype of universal model of the subject for this task.

Key words: models of a subject, social types, cognitive basis, adequacy of basis to a task, the informatics triad, biological metaphor.

Настоящая статья продолжает ряд публикаций [1-4], связанных с образовательной робототехникой. Здесь кратко рассматривается специфика детализации моделей роботов, связанная с их обучением, а также коммуникацией с людьми и между собой. Подходом, использованным в данной работе, является перенос отдельных свойств живых организмов на системы искусственного интеллекта и роботов. Переносу предшествует исследование указанных свойств.

Известны многочисленные исследования работы мозга на уровне систем нейронов. Так, в [5] предложены интересные модели когнитивной гиперсети головного мозга (когнитома), состоящей из взаимосвязанных групп

нейронов, представляющих элементы субъективного опыта двух типов: обобщающих функциональные системы и элементы феноменального опыта.

Продолжаются исследования по локализации в мозгу различных функций. Дополнительно к цитоархитектоническим полям Бродмана определены участки, отвечающие за рефлекссию, положительные и отрицательные эмоции, восприятие ситуации как ошибки. Интересный комплексный анализ сделан в [6].

Наш подход сосредоточен на смысловой структуре и алгоритмах когнитивных процессов. Приведём аналогию из области вычислительной математики: быстрое преобразование Фурье обеспечило такое ускорение вычислений, которое резко снизило требование к быстродействию компьютеров. Эпизод из далёкого прошлого: переход от римской (по мнению историков, греческой либо египетской) системы счисления к арабской (на самом деле индийской). Сомнительно, что изучение нейронных связей мозга привело бы к открытию новой системы счисления.

Здесь надо упомянуть фундаментальную триаду информатики: «Задача + Программа + Исполнитель», которая в общем случае является гомеостатической. Так, решение определённой задачи может быть обеспечено разными конфигурациями «Программа + Исполнитель», и повышение потенциала одного компонента снижает требования к другому. Напомним здесь о принципе использования базиса, адекватного решаемой задаче. В качестве примера можно указать на представления синусоидального и прямоугольного импульсов в базисах Фурье и Хоара (Уолша).

Именно формирование такой триады в конкретной ситуации и является проблемой кросс-технологий. Специфика предлагаемого процесса обучения заключается в том, что способ представления материала для изучения конструируется максимально адекватно когнитивным возможностям обучаемого субъекта (объекта). Это, соответственно, требует, как диагностирования указанных возможностей, так и наличия полного набора форматов представлений учебного материала. Такой набор является базисом, на основе которого конструируется учебный процесс.

В терминах упомянутой триады когнитивные возможности обучаемого являются потенциалом Исполнителя, а у системы обучения появляются, как минимум, две задачи:

А) Форматировать учебный материал (систему «Задача 1 + Программа 1») в базисе, адекватном Исполнителю.

Б) Сформировать систему «Задача 2 + Программа 2», в результате реализации которой будет повышен потенциал Исполнителя.

Рассматривая смысловую структуру когнитивных процессов, можно воспользоваться аналогией с процессами, происходящими в живых организмах. Одним из таких процессов является функционирование протеинов в клетках. Каждый вид клеток вырабатывает свои белки, которые используются как строительный материал, катализатор и т.п. Мы использовали эту аналогию для представления процессов в когнитивных системах на уровне обработки информации [6]. Реализация аналогов таких функций позволяет структурировать учебный процесс и детализировать проблемы освоения учебного материала. Например, запоминание может быть ассоциировано с защитной функцией, и биологическая аналогия может подсказать способы обеспечения запоминания.

Нами был предложен термин «*когнитивная фармация*» [7], сконструированный по аналогии с процессом ручного изготовления лекарств для конкретного пациента, в отличие от фармацевтики—промышленного изготовления лекарственных средств. Как правило, врач прописывает пациенту некоторый набор готовых лекарств. В нашем случае термин указывает на формирование учебного процесса, ориентированного на когнитивную систему конкретного участника образовательного процесса в конкретной ситуации, в частности, при наличии когнитивного иммунитета [4]. В качестве инфраструктуры нами используются кросс-технологии, а функции врачей и фармацевтов возложены на сервисную команду ситуационного центра [2].

Указанные выше соображения обусловили постановку задачи построения типологии роботов (систем искусственного интеллекта), которая могла бы быть полезной для исследования процессов и протоколов контактов роботов между собой и контактов роботов с людьми. В качестве рабочей версии такой типологии использована соционика.

Соционика (в версии англоязычных стран – TypeWatching) в настоящее время является достаточно популярной дисциплиной. Она преподаётся во многих учебных заведениях. Количество книг и сайтов, посвящённых соционике, исчисляется сотнями. Мы здесь ограничимся ссылкой на доступное по Интернет учебное пособие [8].

Достоинство соционики, по нашему мнению, во многом обусловлены ориентацией её основ на фундаментальные категории: вещество, энергия, пространство, время. Модель субъекта, построенная на её основе, является достаточно универсальной. Это позволяет создавать Программы, адекватные комплексу (Задача + Исполнитель). В общем случае модель позволяет оценить соответствие ресурсов Исполнителя поставленной Задаче.

Ниже приведены описания компонентов модели, содержащие краткий анализ сходства и различия их реализации у людей и роботов. Для обозначения этих компонентов мы из различных систем обозначений

используем 4-х буквенную нотацию TypeWatching. Эта нотация позволяет формально вычислять характер отношений (иначе, информационного метаболизма) двух субъектов. Каждая из четырёх позиций нотации может быть занята одной из двух букв, соответствующих определённой характеристике. Рассмотрим эти характеристики.

Первая позиция соответствует так называемой «вертности», и может быть занята буквой **I**, соответствующей интроверсии (Introversion) субъекта, либо буквой **E**, соответствующей экстраверсии (Extraversion). Эта характеристика соответствует предпочитаемому субъекту энергетическому режиму: накопление (интроверсия) либо расходование (экстраверсия). В живых организмах эта характеристика отражает преобладание парасимпатической либо симпатической вегетативной нервной системы. Для робота эта характеристика может соответствовать режимам поиска источника энергии (например, света для подзарядки батарей) либо расходованию (например, разрушения препятствия).

Вторая позиция соответствует предпочтениям субъекта относительно ориентации в пространстве и времени. Она может быть занята буквой **S**, соответствующей сенсорике (Sensor) либо буквой **N**, соответствующей интуиции (iNtuition). Сенсорика соответствует преимущественной ориентации на детализацию текущей ситуации в данный момент времени. Интуиция соответствует анализу прошлого опыта в аналогичных ситуациях и прогнозированию развития данной ситуации. Для робота эти понятия могут ассоциироваться с мобилизацией максимального количества датчиков (сенсоров), либо с поиском в базе прецедентов аналогов ситуации и формированием модели прогноза.

Третья позиция соответствует типу анализа ситуации, обусловленному историей взаимодействия с другими субъектами. Здесь буква **T** соответствует преимущественному режиму логического анализа ситуации (Thinking). Этот режим использует критерии «правильно», «логично», «по закону» и т.п. Буква **F** соответствует режиму этического восприятия ситуации (Feeling). Этот режим использует критерии «справедливо», «милосердно», «по совести». Для роботов использование логического режима достаточно очевидно. Однако появляются работы, учитывающие эмоциональные аспекты деятельности в системах искусственного интеллекта, например, [8]. Кроме того, средства распознавания этических характеристик развиваются достаточно быстро. В качестве примера можно указать на возможности фотокамеры Artificial Smile, которая заставит людей улыбаться в обязательном порядке – если человек забыл сделать соответствующее лицо, то камеры сама пририсует ему улыбку. На первом этапе камера распознает улыбки на лицах. Если на одном из лиц фотоаппарат не находит улыбку, то камера начинает искать в базе данных схожую

фотографию и затем преобразует грустное лицо в довольное. Однако разработчики советуют не использовать такую камеру на похоронах.

Четвёртая позиция соответствует известной характеристике право-левополушарности. Буква **J** соответствует т.н. рациональному (**Judging**) восприятию ситуации, планированию и поведению, что обычно ассоциируют с доминированием левого полушария. Буква **P** соответствует т.н. иррациональному (правополушарному) образу действий (**Perceive**). Для систем искусственного интеллекта эта характеристика может ассоциирована с пропорцией детерминированности и стохастичности алгоритмов обработки информации, а также выбора стратегии и тактики поведения.

Таким образом получаются 16 типов субъектов. Соционика позволяет оценить степень пригодности субъекта определённого типа для выполнения конкретной деятельности, а также сделать прогноз успешности контактов с другими субъектами. В частности, контакт двух субъектов, у которых не совпадают буквы (характеристики) во всех четырёх позициях, квалифицируются как конфликт, обусловленный ложным пониманием смысла контакта при наличии обоюдной иллюзии понимания. Простой пример: обмен данными может привести к обоюдным ошибкам, если для одних и тех же параметров используются разные показатели и/или размерности (температура по Цельсию и Фаренгейту, вес в граммах и унциях и т.п.).

Авторский способ определения социотипа соответствует подходу [10]. В качестве механизма диагностики используется группа людей, как правило, студентов. Знакомство участников с соционикой обязательным не является. Группе последовательно предъявляются вопросы теста, относящиеся к одной из четырёх характеристик. Из двух наборов признаков, относящихся к разным вариантам проявления одной характеристики, например, «логика» / «этика», предлагается выбрать набор, относящийся к анализируемой персоне (персонажу). Решение принимается по большинству голосов. Практика показывает, что такая блиц-диагностика занимает не более 20 минут и является достаточно адекватной.

Возвращаясь к задаче обучения, отметим, что знание (социо)типа обучаемой системы позволяет выбрать формат представления информацией, а также понять, какие именно компоненты могут быть добавлены с учётом конкретной ситуации. Например, для робота может быть установлена необходимость повысить сенсорные возможности (установить дополнительные сенсоры и программы телеметрии), и/или повысить степень стохастичности в программе поведения.

Дальнейшее развитие моделей субъекта предполагается сделать с учётом работ [11 - 13]. Их использование позволит сделать поведение роботов более гибким. Дополнительно возникает интересная задача моделирования эволюции популяций роботов [14].

Список литературы

1. Филимонов В.А. Облачная робототехника: социальные сети и навигаторы // Робототехника и искусственный интеллект - 2012: Материалы IV Международной научно-практической конференции. - Красноярск: Центр информации, 2012. – С. 134-137.
2. Филимонов В.А. Когнитивная инфраструктура обучения людей и роботов (текст пленарного доклада) // Робототехника и искусственный интеллект - 2014: Материалы VI международной научно-практической конференции.– Красноярск: Центр информации, 2014. – С. 205-209.
3. Uglev V.A., Filimonov V.A., Mishkina N.Yu. Hybrid approach to the management by feedback when working with Automated Educational Systems // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).– Omsk: OmGTU, 2015.– // <https://www.researchgate.net/publication/301344716/>
4. Филимонов В.А. Когнитивный иммунитет как проблема и когнитивная инфраструктура как ресурс // Робототехника и искусственный интеллект - 2015. Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: Изд-во Сибирского федерального ун-та, 2016. – С. 181 -186.
5. Витяев Е.Е. Формализация когнитивного // Нейроинформатика.– Т.9, №1. – 2016. – С. 26-36. // http://math.nsc.ru/AP/ScientificDiscovery/PDF/kognitom_formalization.pdf .
6. Широчихин В.П. Архитектоника мышления и и нейроинтеллект. Программирование доверия в эволюции интеллекта.– М.: Юниор, 2004.– 560 с.
7. Филимонов В.А. Белки в клетке как метафора когнитивной фармации при обучении математике // <http://conf.nsc.ru/files/conferences/MathEducation-2016/fulltext/338766/338776/filimonov-v-a-omgtu-2016-2.pdf>.
8. Антошкин В.Н. Педагогическая соционика [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Антошкин В.Н.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2008.— 216 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/4139>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю. (дата обращения: 12.09.2015).
9. Tarasenko S. Emotionally Colorful Reflexive Games // <https://arxiv.org/abs/1101.0820>
10. Шуровьески Дж. Мудрость толпы. Почему вместе мы умнее, чем поодиночке, и как коллективный разум формирует бизнес, экономику, общество и государство. – М.: Вильямс, 2007. – 304 с.
11. Лефевр В.А. Что такое одушевлённость. – М. : Когито-центр, 2013.–125 с.
12. Брандин В.Н. Размерностная сложность. Интеллект. – М.: 2008. – 168 с.
13. Лефевр В.А. Алгебра совести. – М.: Когито-центр, 2003. – 426 с.
14. Филимонов В.А., Филимонова Т.А. Гомеостатические системы рефлексивного управления популяциями // Математические структуры и моделирование. – №3 (31). – 2014. – С. 99–108.