

ПЕРМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МЕХАНИКА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

Сборник статей по материалам
I Всероссийской научно-практической
конференции с международным
участием

(г. Пермь, ПГНИУ, 2–6 декабря 2024 г.)



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
общеобразовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕХАНИКА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

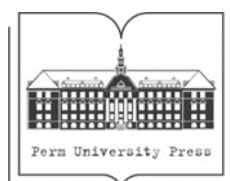
MECHANICS OF MOTION CONTROL AND ROBOTIC COMPLEXES

Сборник статей по материалам I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием

(г. Пермь, ПГНИУ, 2–6 декабря 2024 г.)

Collection of articles on the materials of the I All-Russian scientific-practical conference with international participation

(Perm, PSU, December 2–6, 2024)



Пермь 2025

УДК 531:621.861.8
ББК 222+32.614
М55

М55 **Механика** управления движением и робототехнические комплексы = Mechanics of motion control and robotic complexes [Электронный ресурс] : сборник статей по материалам I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Пермь, ПГНИУ, 2–6 декабря 2024 г.) / отв. ред. М. М. Бузмакова ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2025. – 4,56 Мб ; 97 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/Mekhanika-upravleniya-dvizheniem-i-robototekhnicheskie-kompleksy.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-4212-0

В сборнике представлены материалы I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, которая проводилась 2–6 декабря 2024 г. в Пермском государственном национальном исследовательском университете г. Перми.

В сборнике представлены работы ведущих ученых России, ближнего и дальнего зарубежья, студентов и аспирантов, а также представителей промышленности, занимающихся научными и научно-практическими исследованиями в различных областях науки и техники, таких как космические и авиационные технологии, разработка новых транспортных технологий, достижения в области создания робототехнических комплексов и систем в том числе в сфере сельскохозяйственного производства и нефтеперерабатывающей промышленности, разработка новых композиционных материалов и конструкций.

Сборник предназначен для научных и педагогических работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов и всех, кто интересуется проблемами в области механики движения в космо- и авиационной, урбанистике и развитии транспортной инфраструктуры, создания промышленных роботов, использования алгоритмов и систем управления ИИ в агропромышленности.

УДК 531:621.861.8
ББК 222+32.614

*Издается по решению Ученого совета физико-математического института
Пермского государственного национального исследовательского университета*

Ответственный редактор М. М. Бузмакова
Edited by M. M. Buzmakova

Рецензенты: д-р. техн. наук, профессор кафедры ПМиСА ФТИ СГТУ имени Гагарина Ю. А.
В. С. Попов;

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры информационной безопасности Астраханского государственного университета имени В. Н. Татищева **В. А. Черкасова**

ISBN 978-5-7944-4212-0

© ПГНИУ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Баринава Е.В., Тимбай И.А., Миронов Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ НАНОСПУТНИКА СТАНДАРТА CUBESAT С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ.....	5
Барулина М.А., Голиков А.В., Панкратова Е.В., Маркелова О.В. РАЗРАБОТКА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ИЗ РАДИОСТОЙКОГО СТЕКЛА С РАЗНЫМИ СТРУКТУРАМИ ПОДВЕСА ИНЕРЦИОННОЙ МАССЫ.....	7
Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г., Борисова В.Л. УЧЕТ ТРЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ УПРАВЛЯЕМОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА	11
Вака Веласкес Д.П., Аваряскин Д.П. ФОРМИРОВАНИЕ ИНСПЕКЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ЛУННЫХ ОРБИТАХ	18
Власов А.Н., Ощепков А.Ю. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМОМ И СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПОЛОЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРИКОПТЕРА	20
Газеев Е.Д. АВТОМАТИЗАЦИЯ ДЕТЕКЦИИ КЛУБНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ YOLO	25
Гилёв Д.А., Шкарапута А.П. ПОСТРОЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАМКНУТОМ ПОМЕЩЕНИИ.....	32
Грузликов А.М. ПОСТРОЕНИЕ МЕТРИКИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ТРАЕКТОРНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ.....	38
Грузликов А.М., Караулов В.Г., Кораблева М.Д. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ АНПА НА ОС РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ.....	43
Забайров А.И., Забалуев А.С., Орлов Т.С., Посягин А.И. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СБОРА ОТХОДОВ	47
Коваленко И.И. РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ МЫШЦ	52
Лазарев В.А., Иванов П.А. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОПРИВОДОМ С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ ДЛЯ ПОВОРОТНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ	57
Маслова К.С. ОСОБЕННОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ ЭКЗОСКЕЛЕТАМИ.....	59

Миронов В.В. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННОЙ СХЕМЫ РОБОТА-МОНОЦИКЛА, ПРИВОДИМОГО В ДВИЖЕНИЕ ПОСТУПАТЕЛЬНЫМИ ПАРАМИ	64
Мухаметсафин Р.Т., Сторожев С.А. НАВИГАЦИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ И КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ	71
Самохин А.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТСРОЧКИ ПОИМКИ ЦЕЛИ В АДТ-ИГРЕ В ПРОСТЫХ ДВИЖЕНИЯХ.....	77
Самохина М.А., Самохин А.С. РЕШЕНИЕ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ РАССТАНОВКИ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ ГРАДИЕНТНЫМ МЕТОДОМ	82
Хабибуллина Л.Ф., Хабибуллин Ф.Ф., Кузнецов С.П. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПЕРВИЧНЫХ ОШИБОК В МЕХАНИЗМАХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	87
Чеснокова М.А., Нурмухаметов Д.И., Пономарев Р.С., Терехина Т.А., Аптуков В.Н. ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРНОГО МОСТА ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ	93

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ НАНОСПУТНИКА СТАНДАРТА CUBESAT С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ

Баринаева Елена Витальевна, Тимбай Иван Александрович, Миронов Евгений

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, mironovevgeniy01@gmail.com

В работе рассматривается плоское движение относительно центра масс наноспутника стандарта CubeSat под действием аэродинамического и гравитационного моментов на низких околоземных орбитах. Для качественной оценки параметров движения используется метод фазовой плоскости. Получены условия, при которых происходит смена типа фазового портрета. Найдены аналитические выражения для определения положений равновесия наноспутника относительно центра масс при смещении центра давления относительно центра масс по двум координатам.

Ключевые слова: наноспутник, CubeSat, положения равновесия, фазовые портреты.

Наноспутники (НС) стандарта CubeSat [1] в настоящее время широко используются не только для учебных миссий, но и для исследования Земли и околоземного космического пространства. Успех подобных миссий во многом зависит от соблюдения заданной ориентации НС в пространстве. Для приведения и поддержания НС в требуемом угловом положении часто используют системы пассивной или комбинированной стабилизации. При этом важным этапом при их проектировании является определение положений углового равновесия наноспутника и исследование его динамики в их окрестности. Исследовать движение относительно центра масс НС можно по полной системе дифференциальных уравнений, для которой возможно определить только численное решение. При численном интегрировании довольно сложно определить причины, обуславливающие тот или иной характер движения НС. Поэтому целесообразен поиск приближенных аналитических решений, позволяющих увидеть связь между условиями полёта, параметрами НС и динамикой.

Метод фазовой плоскости позволяет качественно исследовать динамику НС в окрестности положений равновесия. В работе [2] рассматривается космический аппарат с синусоидальной зависимостью аэродинамического момента от угла атаки, что характерно для аппаратов, имеющих форму сферы или тонкого конуса. С использованием фазовых портретов проводится анализ углового движения аппарата под действием аэродинамического и гравитационного моментов. Одной из важных особенностей НС стандарта CubeSat является то, что они имеют форму прямоугольного параллелепипеда, поэтому аэродинамический момент имеет более сложную зависимость, чем у аппаратов сферической формы.

В данной работе с использованием метода фазовой плоскости был проведён анализ плоского движения относительно центра масс наноспутника стандарта CubeSat под действи-

© Баринаева Е.В., Тимбай И.А., Миронов Е., 2025

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда №23-67-10007. URL: <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>.

ем аэродинамического и гравитационного моментов на низких околоземных орбитах. Получены аналитические выражения для определения положений равновесий наноспутника относительно центра масс, а также условия их существования в зависимости от параметров НС и условий полёта. Проведено сравнение исходной модели движения, учитывающей форму наноспутника стандарта CubeSat, и упрощённой, в которой аэродинамический момент аппроксимируется синусоидальной зависимостью от угла атаки. Определена область параметров, в которой использование упрощённой модели углового движения приводит к неверным результатам.

Библиографический список

1. California Polytechnic State University. Cubesat Design Specification Rev 14.1. 2022.
2. *Белецкий В.В.* Движение искусственного спутника относительно центра масс. М.: Наука, 1965. 416 с.

References

1. California Polytechnic State University. Cubesat Design Specification Rev 14.1. 2022.
2. *Beletskii V.V.* Motion of an Artificial Satellite Relative to the Center of Mass [Dvizhenie iskusstvennogo sputnika otnositel'no tsentra mass]. Moscow: Nauka, 1965 (in Russian).

STUDY OF PLANE ANGULAR MOTION OF A CUBESAT NANOSATELLITE USING PHASE PORTRAITS

Barinova Elena V., Timbai Ivan A., Mironov E.

Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia,
mironovevgeniy01@gmail.com

This paper considers the plane motion relative to the center of mass of CubeSat nanosatellites under the action of aerodynamic and gravitational moments in low Earth orbits. The phase plane method is used for qualitative assessment of motion parameters. Conditions under which the type of phase portrait changes have been obtained. Analytical expressions have been found to determine the equilibrium positions of a nanosatellite relative to the center of mass in the orbital coordinate system with a displacement of the center of pressure relative to the center of mass along two coordinates.

Keywords: nanosatellite, CubeSat, equilibrium positions, phase portraits.

РАЗРАБОТКА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ИЗ РАДИОСТОЙКОГО СТЕКЛА С РАЗНЫМИ СТРУКТУРАМИ ПОДВЕСА ИНЕРЦИОННОЙ МАССЫ

*Барулина Марина Александровна, Голиков Алексей Викторович,
Панкратова Елена Владимировна, Маркелова Ольга Викторовна*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки – институт проблем точной
механики и управления Российской Академии наук,
Россия, 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, 24, iptmuran@san.ru

В статье приводятся результаты сравнительного анализа механических характеристик моделей стеклянного МЭМС с подвесом инерционной массы, сформированным из трубок гексагональной и круглой форм. Расчеты выполнены с использованием методов конечно-элементного моделирования. Получена сравнительная оценка возможной чувствительности датчика.

Ключевые слова: акселерометр, МЭМС, чувствительный элемент, радиостойкое стекло.

Введение

МЭМС датчики и, в частности, микромеханические акселерометры (ММА) получили широкое распространение, которое обусловлено относительно невысокой стоимостью производства, малыми габаритами и массой, и низким энергопотреблением [1, 2]. Поэтому разработка новых конструктивных схем и применяемых материалов для производства МЭМС датчиков является актуальной задачей. Данная работа является продолжением исследований авторов по разработке возможных конструктивных схем акселерометра из радиостойкого стекла [3, 4] и перспектив по его применению.

В работе решаются следующие задачи. Разработка альтернативной конструктивной схемы маятникового акселерометра из радиостойкого стекла марки К108 с подвесом инерционной массы (ИМ) из стеклянных трубок круглой и гексагональной формы. Проводится сравнительная оценка механических характеристик ММА с разными подвесами ИМ. Выполнен приблизительный расчет параметров предполагаемого емкостного датчика при различных значениях ускорения.

Конструкция акселерометра

В предыдущих работах [3, 4] расчеты механических свойств прототипа были сделаны с осью чувствительности, размещенной перпендикулярно плоскости ММА. В такой конфигурации полученные результаты не позволяют говорить о возможности применить прототип на практике в силу ряда причин.

© Барулина М.А., Голиков А.В., Панкратова Е.В., Маркелова О.В., 2025

Публикация выполнена при финансовой поддержке в рамках темы государственного задания министерства образования и науки РФ №122030100145-3.

В настоящей работе предложена альтернативная конструктивная схема, суть которой заключается в формировании подвеса ИМ из стеклянных трубок вместо стержней и для реализации емкостного датчика для съема полезного сигнала предлагается сформировать гребенку на одной грани ИМ и соседней грани основания с интегрированной или напыленной на ее поверхности токопроводящей пластины.

Для расчетов была разработана модель ММА с подвесом из трубок круглой и гексагональной форм, с геометрией, близкой к реально получаемой на производстве.

Для определения механических напряжений и деформации с помощью методов конечно-элементного моделирования выполнен расчет предлагаемой конструкции с разными типами подвеса в диапазоне ускорений до 50 g.

Рассматривая поле напряжений в структуре подвеса, можно заметить, что в случае трубок максимальные напряжения сосредоточены в точках спекания отдельных трубок среднего и внешних рядов, а в случае шестиугольников напряжения распределены сравнительно равномерно по наружной стороне внешних рядов.

Расчет максимального отклонения ИМ в зависимости от приложенного ускорения показал значения 11,96 мкм для трубчатой структуры и 9,62 мкм для гексагональной структуры соответственно. Такие значения являются достаточным для обеспечения приемлемой чувствительности датчика.

В результате проведенного модального анализа получены следующие значения пяти собственных частот (Гц): для подвеса из трубчатой структуры 1223.7, 5039.6, 8998.3, 14400, 40596; для подвеса гексагональной структуры 1363.4, 3869.7, 7244.9, 15091, 36534.

Предъявляемые требования по частоте вибрационных нагрузок авиакосмической техники обычно находится в пределах до 180 Гц [5, 6], поэтому полученные значения позволяют утверждать, что возникновение резонанса в рассматриваемой конструкции ММА исключено при его применении в системах управления.

Расчет изменения емкости датчика

Предлагаемая схема емкостного датчика является стандартной для такого типа МЭМС и представляет собой емкостной полумост [7]. Вычисленное ожидаемое максимальное изменение емкости при предложенной геометрии гребенки, для трубчатой структуры подвеса в принятом диапазоне ускорений составляет значения от 0,14 до 7,11 пФ, а для гексагональной структуры от 0,11 до 5,72 пФ соответственно.

Таким образом, величины изменения емкости датчика достаточны для регистрации ускорений в указанных диапазонах.

Заключение

Предложена конструктивная схема ММА из перспективного радиостойкого стекла. Выполнено моделирование и расчет механических и частотных характеристик модели ММА. Полученные результаты численного моделирования позволяют сделать вывод о том, что предложенная схема имеет хорошие перспективы реального применения, однако требуется экспериментальное подтверждение полученных результатов.

Сравнительный анализ результатов расчета для модели с повесом ИМ из трубок круглой и гексагональной форм показал, что количественные различия незначительны.

Сделан вывод, что гексагональная структура подвеса имеет более высокую устойчивость к разрушению при высоких ударных и вибрационных нагрузках.

Библиографический список

1. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы: учебное пособие. Тул. Гос. университет. Тула, 2002. 392 с.
2. *Джашитов В.Э.* Датчики, приборы и системы авиакосмического приборостроения в условиях тепловых воздействий / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов / под ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. 402 с. ISBN: 5-900780-57-0. EDN: QNSEZN.
3. *Костенко В.Д., Барулина М.А.* К вопросу использования радиостойкого стекла для изготовления микромеханического акселерометра / Навигация и управление движением: сборник Международного семинара (NMC 2023) / под ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова и чл.-корр. РАН проф. О.А. Степанова. АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия, 2023. С. 21–24. EDN: GWBGBI.
4. *Костенко В.Д.* Перспективы использования стеклянных микромеханических акселерометров для космических спутников / В.Д. Костенко, М.А. Барулина, А.В. Щербakov / RusNanoSat-2023: сборник тезисов докладов пятого российского симпозиума по наноспутникам с международным участием, Самара, 06–08 сентября 2023 года. Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, 2023. С. 132–134. EDN: GNOZHJ.
5. ГОСТ 23718-2014.
6. *Безмозгий И.М., Софинский А.Н., Чернягин А.Г.* Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии, №3 (6) / 2014. С. 71–80. EDN: TEMDRT.
7. *Paing Soe Thu, Kalugin V.V., Kochurina E.S.* Modeling and optimization of MEMS comb type capacitive acceleration sensor. Proc. Univ. Electronics, 2023, vol. 28, no. 4. Pp. 452–460. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-4-452-460. EDN: LWHTER.

References

1. *Raspopov V.YA.* Micromechanical devices: textbook. Tul. State University. Tula, 2002. P. 392 (In Russian).
2. *Dzhashitov V.E.* Sensors, devices and systems of aerospace instrumentation under thermal effects / V.E. Dzhashitov, V.M. Pankratov / edited by Acad. RAS V.G. Peshekhonov. SPb: State Research Center of the Russian Federation Central Research Institute “Elektropribor”. 2005. P. 402 (In Russian).
3. *Kostenko V.D., Barulina M.A.* To the question of using radio-resistant glass for manufacturing of the micromechanical accelerometer / Navigation and Motion Control: Collection of the International Seminar (NMC 2023) / edited by Acad. RAS V.G. Peshekhonov. SPb: State Research Center of the Russian Federation Concern “TsNII “Elektropribor” JSC, St. Petersburg, Russia, 2023. Pp. 21–24 (In Russian).
4. *Kostenko V.D.* Prospects of glass micromechanical accelerometers for space satellites / V.D. Kostenko, M.A. Barulina, A.V. Scherbakov / RusNanoSat-2023: Collection of abstracts of the fifth Russian symposium on nanosatellites with international participation, Samara, September 06–08, 2023. Samara: Samara National Research University named after Acad. S.P. Korolev, 2023. Pp. 132–134. EDN: GNOZHJ (In Russian).
5. GOST 23718-2014.

6. *Bezmozgij I.M., Sofinskij A.N., CHernyagin A.G.* Modeling in the problems of vibration resistance of rocket and space engineering structures // Space Engineering and Technology, No.3 (6) / 2014. Pp. 71–80 (In Russian).

7. *Paing Soe Thu, Kalugin V.V., Kochurina E.S.* Modeling and optimization of MEMS comb type capacitive acceleration sensor. Proc. Univ. Electronics, 2023, vol. 28, no. 4. Pp. 452–460. URL: [https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2023-28-4-452–460](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-452-460). EDN: LWHTER.

**DEVELOPING AND COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELS
OF PENDULUM ACCELEROMETER MADE OF RADIO-RESISTANT GLASS
WITH DIFFERENT STRUCTURES OF INERTIAL MASS SUSPENSION**

Barulina Marina A., Golikov Aleksey V., Pankratova Elena V., Markelova Olga V.

Precision Mechanics and Control Institute, Russian Academy of Sciences,
24, Rabochaya st., Saratov, 410028, Russia, golikov@iptmuran.ru

The paper presents the results of comparative analysis of mechanical characteristics of glass MEMS models with inertial mass suspension formed from hexagonal and circular tubes. The calculations using finite element modeling methods were performed. A comparative estimation of possible sensitivity of the sensor is obtained.

Keywords: accelerometer, MEMS, sensitive element, radio-resistant glass.

УЧЕТ ТРЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ УПРАВЛЯЕМОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА

Борисов Андрей Валерьевич

Филиал ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, 214013,
Россия, 214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1, BorisowAndrej@yandex.ru

Каспирович Иван Евгеньевич, Мухарлямов Роберт Гарабиевич

Институт физических исследований и технологий,
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»,
Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, kaspirovich.ivan@mail.ru, robgar@mail.ru

Борисова Вероника Леонидовна

ФГБОУ ВО «Смоленская государственная сельскохозяйственная академия»,
Россия, 214000, г. Смоленск, ул. Большая Советская, 10/2, borisowaveronika@yandex.ru

Рассматривается влияние трения на динамику экзоскелета, содержащего звенья, изменяющие свою длину. С целью изучения воздействия сил трения в шарнирах на динамику антропоида составлена система уравнений движения Лагранжа второго рода. Записанные дифференциальные уравнения движения экзоскелета учитывают явление трения в шарнирах. Для проведения численного анализа применялась экспериментальная информация о человеке и его локомоциях. Обобщенные координаты, описывающие изменение расстояний между осями вращения в шарнирах, то есть длин звеньев, описываются экспериментальными данными. Обобщенные координаты, определяющие углы в шарнирах между звеньями определяются путем численного решения задачи Коши для составленной системы дифференциальных уравнений. Управлением в рассматриваемой антропоидной системе являются моменты, прикладываемые в шарнирах. Они определяются экспериментально и являются известными зависимостями. Силы, которые действуют вдоль звеньев, определяются путем решения системы дифференциальных уравнений движения. В моделировании антропоидных систем, метод решения, используемый в статье, называется методом заданной синергии. В результате проведенного исследования выяснено, что для антропоидных механизмов учет трения в шарнирах не компенсируется линейным усилением управляющих воздействий. Управляющие моменты в шарнирах необходимо вычислять с учетом трения, чтобы синтезировать антропоидную ходьбу. Следовательно, при выборе конструкции экзоскелета необходима модель с трением в шарнирах-суставах примерно такого же значения, как и в суставах опорно-двигательного аппарата человека, для того, чтобы экзоскелет, обеспечивал комфортабельные передвижения человека в нем и управлялся с помощью усиления импульсов человека.

Ключевые слова: трение, шарнир, экзоскелет, управление, задачи динамики, антропоморфная ходьба, комфортабельные движения, численное решение.

© Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г., Борисова В.Л., 2025

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и г. Москвы, №23–21–10065. URL: <https://rscf.ru/project/23-21-10065/>.

Введение

Широта возможных областей применения экзоскелетов обуславливает актуальность данной работы. Экзоскелет – это внешнее по отношению к опорно-двигательному аппарату человека робототехническое устройство, предназначенное для решения задач увеличения мышечной силы, восстановления двигательных способностей и реабилитации, защиты от внешних негативных воздействий и травм [1–6].

Целью исследования является численное моделирование динамики стержневой антропоидной системы типа экзоскелета с подвижными звеньями, изменяющими свою длину. Применяя созданные ранее методы моделирования антропоидных систем [7–9], исследуем движения экзоскелета с учетом трения.

Влияние трения на систему дифференциальных уравнений движения экзоскелета

Рассмотрим модель экзоскелета с пятью звеньями, изменяющими свою длину, содержащую две двухзвенные ноги и корпус, соединенных цилиндрическими шарнирами (рис. 1).

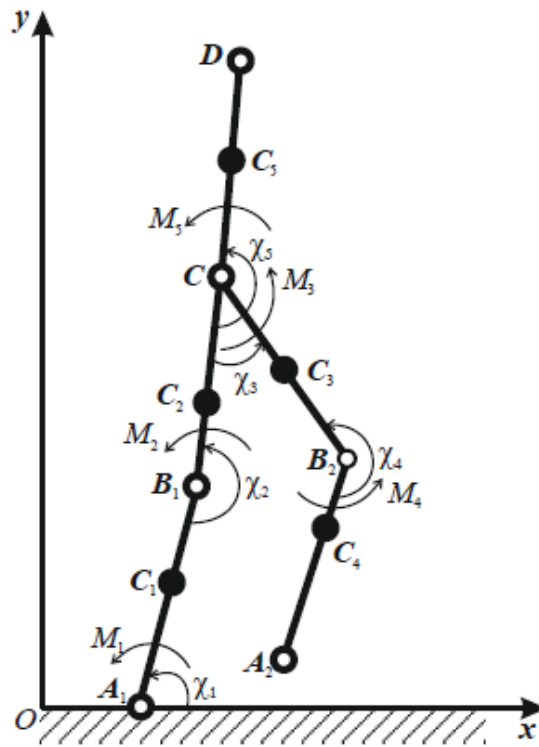


Рис. 1. Экзоскелет с пятью звеньями, изменяющими свою длину

Составленная система дифференциальных уравнений движения антропоидной модели типа экзоскелета, содержащей пять подвижных звеньев, изменяющих свою длину, в одноопорной фазе движения, представлена в матричной форме записи

$$A(\chi, \lambda) \ddot{\chi} + B(\chi, \lambda) \dot{\chi}^2 + gC(\chi) \lambda + 2D(\chi, \lambda) (\dot{\lambda} \dot{\chi}) + E(\chi, \lambda) \ddot{\lambda} = M(t), \quad (1)$$

$$G(\chi, l) \ddot{\chi} + H(\chi, \lambda) \dot{\chi}^2 + gK(\chi) + 2L(\chi, l) (\dot{\lambda} \dot{\chi}) + P(\chi, \lambda) \ddot{\lambda} = F(t), \quad (2)$$

где: λ – обобщенные координаты, описывающие изменения длины звеньев $\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_5 \end{pmatrix}$;

χ – угловые обобщенные координаты $\chi = \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \cdots \\ \chi_5 \end{pmatrix}$; $A(\chi, \lambda)$, $B(\chi, \lambda)$, $G(\chi, \lambda)$, $H(\chi, \lambda)$ – матрицы,

инерции; $C(\chi)$, $K(\chi)$ – матрицы, определяемые моментами силы тяжести; $D(\chi, \lambda)$, $E(\chi, \lambda)$, $L(\chi, \lambda)$, $P(\chi, \lambda)$ – матрицы, учитывающие изменения длин звеньев; $M(t)$, $F(t)$ – матрицы-столбцы обобщенных сил; $\ddot{\chi}$ – матрица обобщенных ускорений; $\dot{\chi}$ – матрица обобщенных

угловых скоростей, тогда $\dot{\chi}^2 = \begin{pmatrix} \dot{\chi}_1^2 \\ \cdots \\ \dot{\chi}_5^2 \end{pmatrix}$; $\dot{\lambda}\dot{\chi} = \begin{pmatrix} \dot{\lambda}_1\dot{\chi}_1 \\ \cdots \\ \dot{\lambda}_5\dot{\chi}_5 \end{pmatrix}$ – матрица произведений $\dot{\lambda}\dot{\chi}$ обобщенных

линейных и угловых скоростей.

Сила вязкого трения моделируется следующей зависимостью:

$$\Psi_n = -\mu_n \frac{d\chi_n}{dt}, \quad (n = 1, 2, \dots, 5), \quad (3)$$

где χ_n – углы в шарнирах между звеньями антропоида, μ_n – коэффициент вязкого трения в шарнирах антропоида (рис. 1).

В результате учета трения в шарнирах антропоида в систему дифференциальных уравнений движения (1)-(2) добавляется выражение (3).

Численный анализ влияния трения на решение прямой и обратной задач динамики для модели экзоскелета

Числовые значения параметров для антропоидной модели для расчетов и длины звеньев задавались интерполяционными функциями времени по эмпирическим данным [1]. Коэффициенты вязкого сопротивления вращению в шарнирах считались равными: $k_n = 0,6$ ($n = 1, 2, \dots, 5$). Результаты решения системы дифференциальных уравнений движения с заданным одинаковым в обоих случаях управлением для голени опорной и переносимой ног представлены на (рис. 2). Сравнение результатов численного решения системы дифференциальных уравнений движения (1) с заданными управляющими моментами для модели без учета трения и с учетом сил трения показывает, что учет трения снижает максимальные значения кинематических характеристик, движение изменяется, конечная конфигурация механизма не совпадает. Чтобы конфигурация модели с учетом сил трения и без учета в конце шага были близки, изменим управляющие моменты в шарнирах.

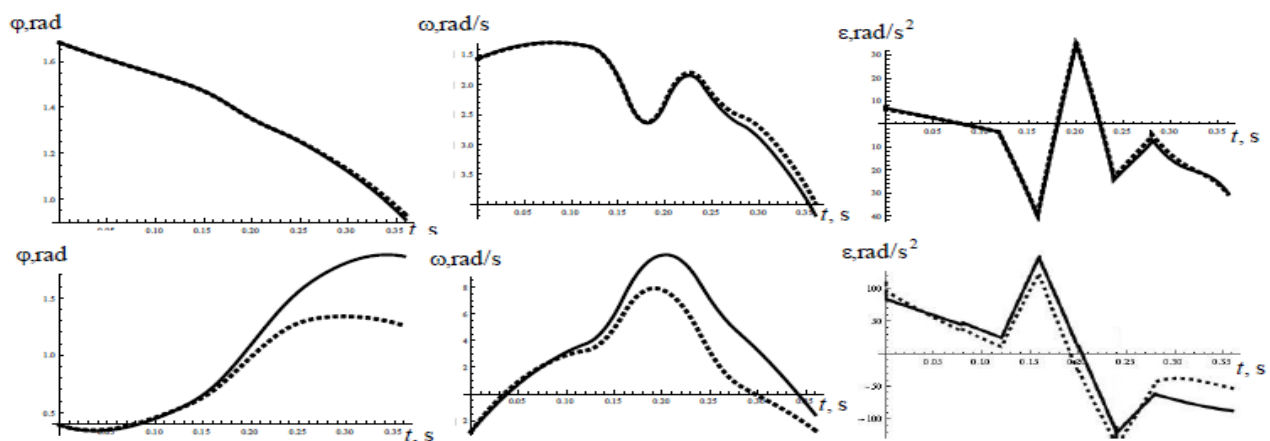


Рис. 2. Угол поворота, угловая скорость, угловое ускорение для голени опорной (вверху) и переносимой (внизу) ног с учетом силы трения – пунктирная линия, без учета – сплошная линия в зависимости от времени

Решим прямую задачу динамики при определенных управляющих моментах из решения обратной задачи, с учетом силы трения (рис. 3).

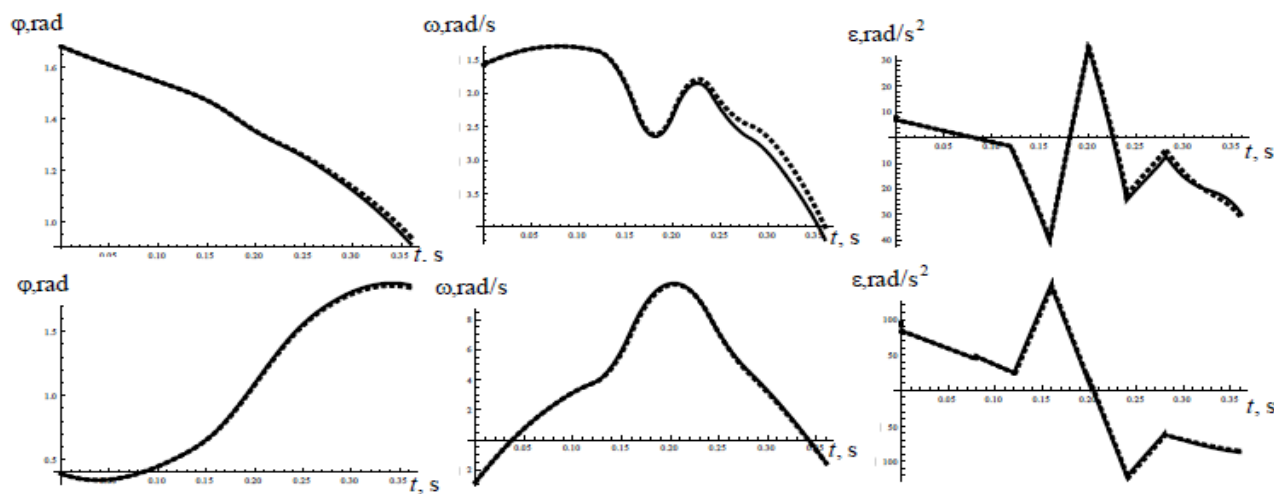


Рис. 3. Угол поворота, угловая скорость и угловое ускорение для голени опорной (вверху) и переносимой (внизу) ног с учетом сил трения – пунктирная линия и без учета – сплошная линия при управляющих моментах при наличии сил трения в зависимости от времени

Видно (рис. 3), что для опорной ноги различия незначительны и имеет место близость результатов. Для переносимой ноги совпадение очень хорошее. Таким образом, введение дополнительной силы трения в шарнирах-суставах можно компенсировать изменением управляющих моментов.

Заключение

В статье рассмотрены вопросы учета трения при создании экзоскелета. Проанализирован вопрос о влиянии на движения экзоскелета трения, возникающего в шарнирах. Проведенное численное решение показало, что при выборе управления экзоскелетом, если имеются значительные силы трения в шарнирах-суставах, нельзя использовать управляющие моменты, рассчитанные без трения, даже если их масштабировать. В этом случае движение не является антропоморфным. Поэтому, если есть значительные силы вязкого трения в шарнирах-суставах, то необходимо пересчитывать управляющие моменты. Данный результат необходимо учитывать при создании реальных экзоскелетов и рассмотрении движения человека в экзоскелете, так как у здорового человека коэффициент трения в суставе очень мал, а в шарнире экзоскелета он на порядок выше. Этим, в частности, объясняется плохое взаимодействие эндо- и экзоскелета в нынешних практических реализациях экзоскелета, в которых осуществляется простое масштабирование управляющих воздействий.

Библиографический список

1. Farris D.J., Hicks J.L., Delp S.L., Sawicki G.S. Musculoskeletal modelling deconstructs the paradoxical effects of elastic ankle exoskeletons on plantar-flexor mechanics and energetics during hopping. *Journal of Experimental Biology*, 2014. No.217. Pp. 4018–4028.
2. W. Bao, D. Villarreal, J.-C. Chiao. Vision-Based Autonomous Walking in a Lower-Limb Powered Exoskeleton // 2020 IEEE 20th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE), Cincinnati, OH, 2020. P. 830–834. Doi: 10.1109/BIBE50027.2020.00141.

3. Pavel Blažek, Josef Bydžovský, Robert Griffin, Karel Mls, Brandon Peterson. Obstacle Awareness Subsystem for Higher Exoskeleton Safety // World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines DISA 2020: Towards Digital Intelligence Society. Pp. 59–71.
4. Glowinski S., Krzyzynski T., Bryndal A., Maciejewski I. A Kinematic Model of a Humanoid Lower Limb Exoskeleton with Hydraulic Actuators. *Sensors* 2020, 20, 6116. DOI: 10.3390/s20216116. EDN: RQAPFZ.
5. Lee T., Lee D., Song B., Baek Y.S. Design and Control of a Polycentric Knee Exoskeleton Using an Electro-Hydraulic Actuator. *Sensors* 2020, 20, 211. URL: <https://doi.org/10.3390/s20010211>.
6. Proud J.K., Lai D.T.H., Mudie K.L., Carstairs G.L., Billing D.C., Garofolini A., Begg R.K. Exoskeleton Application to Military Manual Handling Tasks. *Hum Factors*. 2020 Nov 18:18720820957467. Epub ahead of print. PMID: 33203237. DOI: 10.1177/0018720820957467. EDN: FZKZZM.
7. Blinov A., Borisov A., Konchina L., Kulikova M., Maslova K. Simulation of the movement of the supporting leg of an exoskeleton with two links of variable length in 3D // *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2021, vol.16, no.4. Pp.122–134. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-122-134. EDN: AFLJYS.
8. Blinov A., Borisov A., Konchina L., Novikova M. Applying the models of magnetorheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness // *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2022, vol.98, no.2. Pp. 133–142. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142.
9. Бадяева В.К., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г. Математическая модель тренажера «конь – наездник» и ее программная реализация в системе компьютерной математики Wolfram Mathematica // *Прикладная информатика*. 2024. Т. 19. №1. С. 38–56. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-1-38-56. EDN: QOSVUT.

References

1. Farris D.J., Hicks J.L., Delp S.L., Sawicki G.S. Musculoskeletal modelling deconstructs the paradoxical effects of elastic ankle exoskeletons on plantar-flexor mechanics and energetics during hopping. *Journal of Experimental Biology*, 2014. No.217. Pp. 4018–4028.
2. W. Bao, D. Villarreal, J.-C. Chiao. Vision-Based Autonomous Walking in a Lower-Limb Powered Exoskeleton // 2020 IEEE 20th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE), Cincinnati, OH, 2020. Pp. 830–834. Doi: 10.1109/BIBE50027.2020.00141.
3. Pavel Blažek, Josef Bydžovský, Robert Griffin, Karel Mls, Brandon Peterson. Obstacle Awareness Subsystem for Higher Exoskeleton Safety // World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines DISA 2020: Towards Digital Intelligence Society. Pp. 59–71.
4. Glowinski S., Krzyzynski T., Bryndal A., Maciejewski I. A Kinematic Model of a Humanoid Lower Limb Exoskeleton with Hydraulic Actuators. *Sensors* 2020, 20, 6116. URL: <https://doi.org/10.3390/s20216116>.
5. Lee T., Lee D., Song B., Baek Y.S. Design and Control of a Polycentric Knee Exoskeleton Using an Electro-Hydraulic Actuator. *Sensors* 2020, 20, 211. URL: <https://doi.org/10.3390/s20010211>.
6. Proud J.K., Lai D.T.H., Mudie K.L., Carstairs G.L., Billing D.C., Garofolini A., Begg R.K. Exoskeleton Application to Military Manual Handling Tasks. *Hum Factors*. 2020 Nov 18:18720820957467. Doi: 10.1177/0018720820957467. Epub ahead of print. PMID: 33203237.

7. *Blinov A., Borisov A., Konchina L., Kulikova M., Maslova K.* Simulation of the movement of the supporting leg of an exoskeleton with two links of variable length in 3D // *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2021, vol. 16, no. 4. Pp. 122–134. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-122-134.

8. *Blinov A., Borisov A., Konchina L., Novikova M.* Applying the models of magneto- rheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness // *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2022, vol. 98, no. 2. Pp. 133–142. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142.

9. *Badjaeva V.K., Kaspirovich I.E., Muharlamov R.G.* Mathematical model of the simulator “horse - rider” and its program implementation in Wolf-ram Mathematica // *Applied Informatics*, 2024. T. 19. №1. Pp. 38–56. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-1-38-56 (In Russian).

ACCOUNTING FOR FRICTION IN SOLVING DIRECT AND INVERSE PROBLEMS OF CONTROLLED EXOSKELETON DYNAMICS

Borisov Andrey V.

Branch of the National Research University “MPEI” in Smolensk,
1, Energy passage, Smolensk, 214013, Russia, BorisowAndrej@yandex.ru

Kaspirovich Ivan E., Muharlyamov Robert G.

Institute of Physical Research and Technology Peoples’ Friendship University
of Russia (RUDN University) Moscow,
6, Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russia, kaspirovich.ivan@mail.ru, robgar@mail.ru

Borisova Veronika L.

FSBEI HE “Smolensk State Agricultural Academy”,
10/2, Bolshaya Sovetskaya st., Smolensk, 214000, Russia, borisowaveronika@yandex.ru

The influence of friction on the dynamics of an exoskeleton containing links changing their length is considered. In order to study the effect of friction forces in the hinges on the dynamics of the anthropoid, a system of Lagrange equations of motion of the second kind is compiled. The recorded differential equations of motion of the exoskeleton take into account the phenomenon of friction in the hinges. Experimental information about a person and his locomotion was used to carry out numerical analysis. Generalized coordinates describing the change in the distances between the axes of rotation in the hinges, that is, the lengths of the links, are described by experimental data. Generalized coordinates defining the angles in the hinges between the links are determined by numerically solving the Cauchy problem for the compiled system of differential equations. The control in the anthropoid system under consideration is the moments applied in the hinges. They are determined experimentally and are known dependencies. The forces that act along the links are determined by solving the system of differential equations of motion. In modeling anthropoid systems, the solution method used in the article is called the method of specified synergy. As a result of the conducted research it was found out that for anthropoid mechanisms the consideration of friction in the hinges is not compensated by the linear amplification of control actions. Control moments in the hinges

must be calculated taking into account friction in order to synthesize anthropoid walking. Therefore, when choosing the design of the exoskeleton, a model with friction in the hinges-joints of approximately the same value as in the joints of the human musculoskeletal system is required so that the exoskeleton ensures comfortable movements of a person in it and is controlled by amplifying human impulses.

Keywords: friction, hinge, exoskeleton, control, problems of dynamics, anthropomorphic walking, comfortable movements, numerical solution.

ФОРМИРОВАНИЕ ИНСПЕКЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ЛУННЫХ ОРБИТАХ

Вака Веласкес Доменика Паулина, Аваряскин Денис Петрович

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, avaryaskin.dp@ssau.ru

В работе решается задача выбора начальных параметров относительного движения космических аппаратов (КА) для обеспечения и сохранения инспекционной траектории. Исследование включает моделирование относительного движения двух КА (опорный и инспектор) на низких лунных круговых орбитах.

Ключевые слова: инспекционная траектория, космические аппараты, гравитационное поле Луны, низкие лунные орбиты, относительное движение, инспектор.

В работе решается задача выбора начальных параметров относительного движения космических аппаратов (КА) для обеспечения и сохранения инспекционной траектории. Под инспекционной в данной работе понимается относительная траектория, по которой один КА (инспектор) совершает облёт другого КА (опорного). В идеальном случае такая траектория должна быть замкнутой, однако, легко добиться этого с помощью выбора начальных условий движения возможно только в центральном гравитационном поле. [1] Луна имеет сложное гравитационное поле и моделирование движения КА по орбитам вокруг неё требует учитывать не только вторую зональную гармонику, но и гармоники более высоких порядков.

Исследование включает моделирование относительного движения двух КА (опорный и инспектор) на низких лунных круговых орбитах. В качестве орбит для опорного КА рассматриваются известные стабильные и «замороженные» орбиты [2–5], что позволило проанализировать их применимость в реализации задач инспекции.

Результаты исследования показали наличие трёх основных видов эволюции относительной траектории в орбитальной системе координат: перемещение вдоль оси Ox , вращение вокруг осей Oy и Ox . Обосновано использование 15 гармоник гравитационного потенциала Луны для анализа относительного движения КА вокруг Луны.

Показано, что не все стабильные орбиты подходят для выполнения задач инспекции. Полярные орбиты продемонстрировали свои преимущества за счёт меньшей неустойчивости относительной траектории. Показано, что на неполярных орбитах эффект увеличения эксцентриситета относительной траектории со временем имеет значительное влияние на инспекционное движение.

Библиографический список

1. *Scherbakov M.S., Avariaskin D.P.* Studying problems on choosing stable orbits of nanosatellites to provide passive and periodic relative trajectories // Journal of Physics: Conference Series. 2020. T. 1536, №1. 8 с.
2. *Ramanan R.V., Adimurthy V.* An analysis of near-circular lunar mapping orbits // J Earth Syst Sci. 2005. №114. Pp. 619–626. DOI: 10.1007/bf02715946. EDN: HSKFVQ.
3. *Russell R., Lara M.* Repeat Ground Track Lunar Orbits in the Full-Potential Plus Third-Body Problem // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. 2006. №6750.
4. *Чунжуй Д., Старинова О.Л.* Анализ стабильности низких селеноцентрических орбит // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. №10.19 с.
5. *Гордиенко Е.С., Ивашкин В.В., Симонов А.В.* Анализ устойчивости орбит искусственных спутников луны и выбор конфигурации лунной навигационной спутниковой системы // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. №34. С. 40–54.

References

1. *Scherbakov M.S., Avariaskin D.P.* Studying problems on choosing stable orbits of nanosatellites to provide passive and periodic relative trajectories // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1536, No. 1. 8 p.
2. *Ramanan R.V., Adimurthy V.* An analysis of near-circular lunar mapping orbits // J Earth Syst Sci. 2005. No. 114. Pp. 619–626.
3. *Russell R., Lara M.* Repeat Ground Track Lunar Orbits in the Full-Potential Plus Third-Body Problem // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. 2006. No. 6750.
4. *Chunzhuj D., Starinova O.L.* Analysis of the stability of low selenocentric orbits // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2020. №10. 19 p.
5. *Gordienko E.S., Ivashkin V.V., Simonov A.V.* Analysis of the stability of orbits of artificial satellites of the moon and the choice of the configuration of the lunar navigation satellite system // Bulletin of S.A. Lavochkin NPO. 2016. No. 34. Pp. 40–54.

FORMATION OF INSPECTION MOTION FOR SPACECRAFT IN LUNAR ORBITS

Vaca Velasquez Domenica Paulina, Avariaskin Denis P.

Samara National Research University, 34, Moskovskoye hwy., Samara, 443086, Russia,
domepao026@gmail.com

In this work, the problem of selecting the initial parameters for the relative motion of spacecraft (SC) to ensure and maintain the inspection trajectory is addressed. The study includes modeling the relative motion of two SCs (reference and inspector) in low lunar circular orbits.

Keywords: inspection trajectory, spacecraft, lunar gravitational field, low lunar orbits, relative motion, inspector.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМОМ И СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПОЛОЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРИКОПТЕРА

Власов Александр Николаевич, Ощепков Александр Юрьевич

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, anvlsov99@yandex.ru

Рассматривается задача управления подъемом и горизонтальной ориентацией беспилотного трикоптера с тяговыми двигателями, расположенными в одной плоскости, в вершинах правильного треугольника. Построена математическая модель динамики трикоптера с учетом наличия нагрузки с переменной массой и координатой приложения. Представлены алгоритм управления тягой двигателей трикоптера для стабилизации его только по высоте без учета отклонения ориентации и алгоритм управления для стабилизации по высоте и ориентации с учетом углов крена и тангажа, основанные на ПИД-регуляторе. Представлен закон управления с применением быстрого алгоритма 2 порядка для подъема трикоптера и рассмотрены границы применения быстрого алгоритма. Построена и исследована компьютерная модель трикоптера и системы управления в пакете Simulink.

Ключевые слова: моделирование процессов управления, робастные алгоритмы, система стабилизации, беспилотные летательные аппараты, трикоптеры.

Мультикоптеры относятся к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) с двигателями роторного типа, обеспечивающими вертикальный взлёт и посадку, а также полёт по маршруту и управление углами тангажа, крена и рысканья для обеспечения навигационного полётного задания. Обычно используются БПЛА с тремя двигателями (трикоптеры), четырьмя (квадрокоптеры) и шестью двигателями (гексакоптеры). Для обеспечения заданного вектора тяги необходимо минимум три управляющих элемента, поэтому квадрокоптеры и гексакоптеры обладают избыточным количеством органов управления по сравнению с числом контролируемых параметров. В работе [1] отмечается, что такая избыточность обеспечивает отказобезопасность. Однако, повышение количества двигателей, увеличивая подъёмные возможности и стабильность полёта, вместе с тем увеличивает энергопотребление и массу аппарата. Кроме того, мультикоптер с меньшим количеством двигателей обладает большей маневренностью. Таким образом, конструкция трикоптера представляется оптимальной и весьма перспективной, хотя малоизученной [2].

В данной работе с помощью компьютерного моделирования исследуются возможности применения классических и новых алгоритмов для управления высотой полёта трикоптера, а также рассматриваются процессы управления углами крена и тангажа при несимметричном изменении массы платформы, например, при сбрасывании с неё какого-либо груза. Работоспособные алгоритмы в дальнейшем могут быть реализованы в бортовых системах управления с помощью методов модельно-ориентированного проектирования [3].

Схема модели приведена на рис. 1. Двигатели вертикальной тяги находятся в вершинах правильного треугольника со стороной $2a$ в точках 1, 2 и 3. Масса платформы M_0 равномерно распределена по этим точкам. На платформе находится груз массы m в точке с полярными координатами (ρ, α) . Общая масса трикоптера с грузом $M = M_0 + m$. Угол крена обозначен φ , угол тангажа – ϑ .

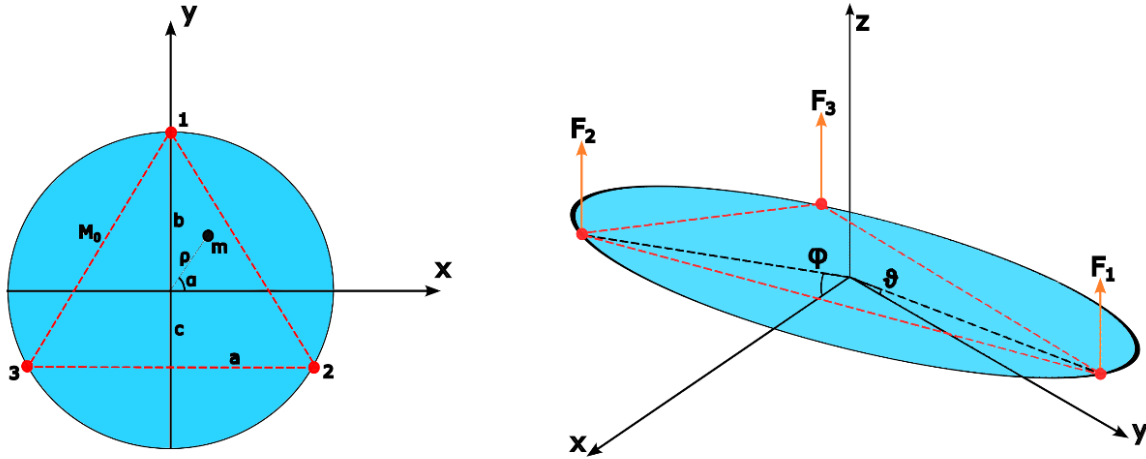


Рис. 1. Схема модели трикоптера

Уравнения движения в собственной системе координат имеют вид:

$$M\ddot{z} = -Mg + F_1 + F_2 + F_3 \quad (1.1)$$

$$I_X \ddot{\varphi} = (F_2 + F_3)b + bF_1 - mg\rho \sin \alpha; \quad I_Y \ddot{\vartheta} = (-F_3)a + mg\rho \cos \alpha, \quad (1.2)$$

где моменты инерции I_X, I_Y выражаются следующим образом:

$$I_X = \frac{1}{3}M_0(2c^2 + b^2) + m(\rho \sin \alpha)^2; \quad I_Y = \frac{1}{3}M_0(2a^2) + m(\rho \cos \alpha)^2. \quad (2)$$

Задача управления состоит в том, чтобы поднять трикоптер вдоль вертикальной оси Z системы координат, связанной с землёй, на заданную высоту h и удерживать платформу в горизонтальном положении при изменяющихся параметрах груза: $z \rightarrow h, \varphi \rightarrow 0, \vartheta \rightarrow 0$.

Требуемые силы тяги для каждого двигателя определяются по формулам:

$$F_i = \frac{1}{3}F_T + U_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad \sum_{i=1}^3 U_i = 0. \quad (3)$$

Предполагается, что бортовому контроллеру доступны значения высоты и углов крена и тангажа, по которым он рассчитывает компоненты управления $U(z), U(\vartheta), U(\varphi)$. Из симметрии объекта и условия (3) следуют выражения для компонент мощностей, подаваемых на двигатели:

$$F_T = U(z), \quad U_1 = U(\vartheta), \quad U_2 = U(\varphi) - \frac{1}{2}U(\vartheta), \quad U_3 = -U(\varphi) - \frac{1}{2}U(\vartheta). \quad (4)$$

Блок-схема системы управления приведена на рис. 2. Математическая модель объекта управления в схеме описывается уравнениями движения (1) с учётом выражений (2).

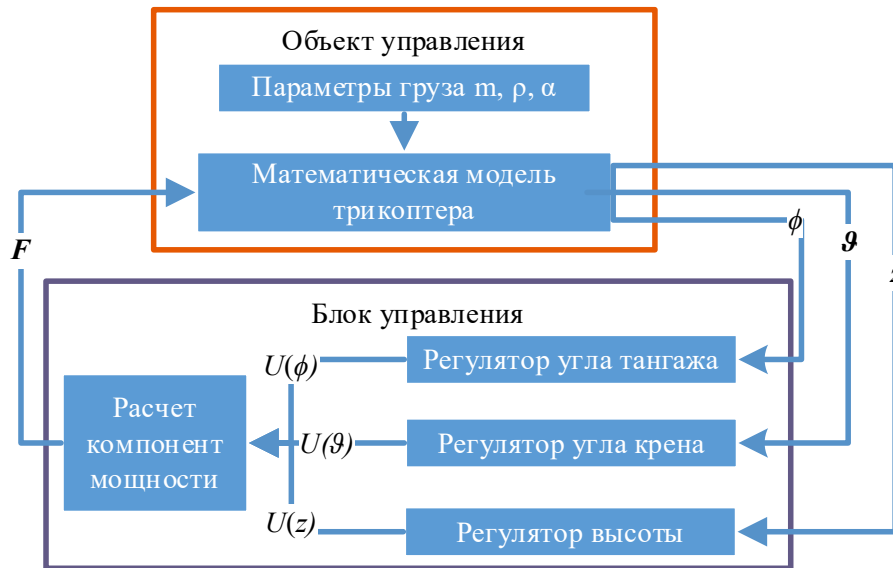


Рис. 2. Блок-схема системы управления

Блок-схема реализована в пакете Simulink среды MATLAB. В регуляторах углов использован известный ПИД-закон управления, для управления высотой исследованы два алгоритма: ПИД-закон и быстрый алгоритм для систем 2-го порядка [4], требующий знания параметров объекта. Для применения быстрого алгоритма проведена дискретизация уравнения (1.1) по схеме Эйлера с шагом дискретизации T и получена дискретная система разностных уравнений, эквивалентная непрерывной [5]. Быстрый алгоритм работает по правилу

$$F_T[k] = Mg - \frac{1}{2}(1 - (-1)^{k+1}) \frac{M}{T^2} X_1[k] - \frac{M}{T} \left(1 - \frac{\lambda}{M} T\right) X_2[k], \quad (5)$$

$$X_1 = z - h, X_2 = \dot{z} \quad) \equiv X[k], k = 0, 1, 2, \dots$$

Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 3, 4. Проведённые исследования показали, что ПИД-закон работоспособен в широком интервале значений коэффициентов, область робастности определяется требованием к точности и быстродействию системы управления.

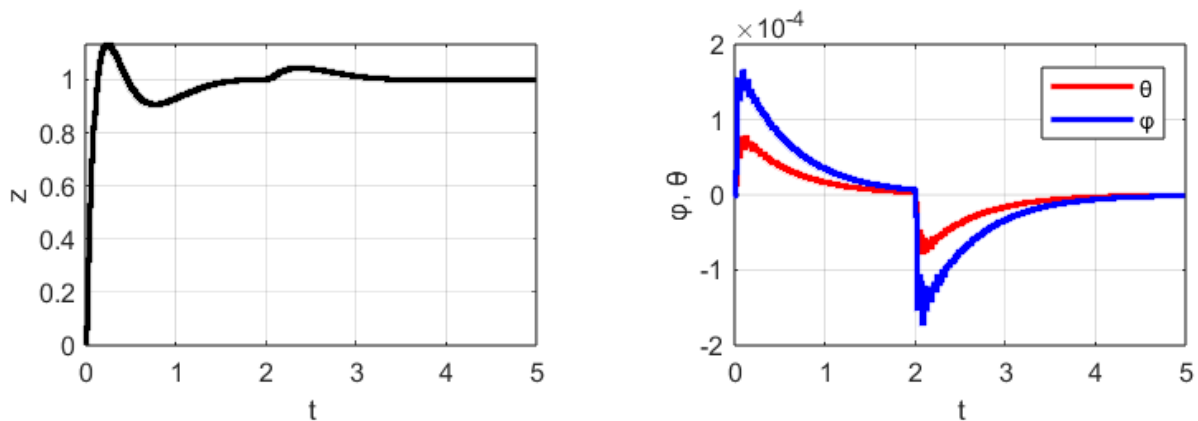


Рис. 3. Подъём платформы с грузом, который сбрасывается при $t=2$, и стабилизацией горизонтального положения. Работают ПИД-регуляторы с коэффициентами, настроенными с помощью пакета Response Optimizer

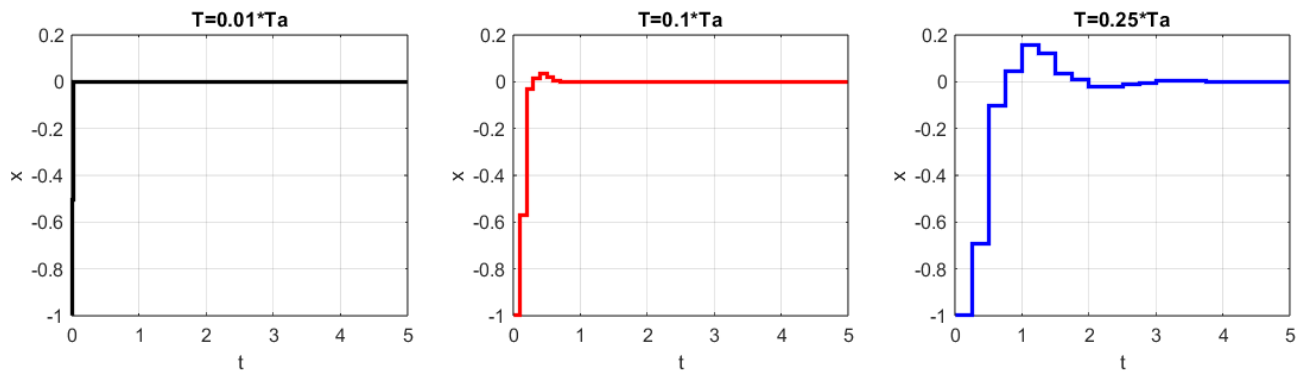


Рис. 4. Управление вертикальным подъёмом с помощью быстрого алгоритма при разных значениях шага дискретизации

Работа быстрого алгоритма исследована при различных временах дискретизации. Установлено, что при $T > 0.5T_a$ ($T_a = \sqrt{a/g}$) дискретный алгоритм управления непрерывным объектом приводит к неустойчивости системы. Рекомендовано после набора требуемой высоты переключать управление на ПИД-закон.

Библиографический список

1. Аполлонов Д.В., Артамонов М.А., Бибикова К.И., Ермаков М.В., Петрова А.А., Шибачев В.М. Формирование структуры и разработка алгоритмов системы автоматического управления БЛА конвертопланного типа // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления «ВСПУ 2024». Россия, Москва, ИПУ РАН, 17–20 июня 2024 г. Электронный препринт. С. 1494–1497.
2. Нгуен З.Х., Путов В.В., Шелудько В.Н. Алгоритмы управления полётом беспилотных летательных аппаратов типа трикоптера с поворотными винтами // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления «ВСПУ 2024». Россия, Москва, ИПУ РАН, 17–20 июня 2024 г. Электронный препринт. С. 1498–1502.
3. Ощепков А.Ю., Власов А.Н. Компьютерное моделирование робастных и адаптивных алгоритмов в технологии модельно-ориентированного проектирования // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2024. Вып. 1 (64). С. 43–52. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-1-43-52.
4. Ощепков А.Ю., Исаков К.А. Универсальные быстрые алгоритмы управления для объектов с инерцией // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. №3. С. 10–16.
5. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб: Наука, 1999. 467 с.

References

1. Apollonov D.V., Artamonov M.A., Bibikova K.I., Ermakov M.V., Petrova A.A., Shibachev V.M. Formation of the structure and development of algorithms for the automatic control system of tiltrotor-type UAVs // XIV Vserossiyskoe soveshanie po problemam upravleniya “VSPU 2024”. Russia, Moscow, IPU RAS, 2024. Pp. 1494-1497 (In Russian).
2. Nguyen Z.H., Putov V.V., Sheludko V.N. Flight control algorithms for tricopter-type unmanned aerial vehicles with rotary screws // XIV Vserossiyskoe soveshanie po problemam upravleniya “VSPU 2024”. Russia, Moscow, IPU RAS, 2024. Pp. 1498-1502 (In Russian).

3. *Oshchepkov A.Yu., Vlasov A.N.* Computer modeling of robust and adaptive algorithms in model-oriented design technology // Vestnik Permskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika. 2024. Vol. 1. Pp. 43–52 (In Russian).

4. *Oshchepkov A.Yu., Isakov K.A.* Universal fast control algorithms for objects with inertia // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika. 2009. Vol. 3. Pp. 10-16 (In Russian).

5. Andrievsky B.R., Fradkov A.L. Selected chapters of the theory of automatic control with examples in MATLAB. SPb: Nauka, 1999. 467 p. (In Russian).

COMPUTER SIMULATION OF CONTROL PROCESSES FOR LIFT AND STABILIZATION OF THE POSITION OF AN UNMANNED TRICOPTER

Vlasov Aleksandr N., Oshchepkov Aleksandr Yu.

Perm State University, 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia, anvlasov99@yandex.ru

The problem of control of the ascent and horizontal orientation of an unmanned tricopter with motors located in the same plane, at the vertices of a regular triangle, is considered. A mathematical model of the tricopter dynamics is constructed taking into account the presence of a load with a variable mass and application coordinate. An algorithm for controlling the tricopter motor thrust for stabilizing it only in height without taking into account the orientation deviation and a control algorithm for stabilizing in height and orientation taking into account the roll and pitch angles, based on a PID controller, are presented. A control law using a 2nd fast order algorithm for tricopter ascent is presented and the application limits of the fast algorithm are considered. A computer model of the tricopter and the control system is constructed and studied using Simulink.

Keywords: modeling of control processes, robust algorithms, stabilization system, unmanned aerial vehicles, tricopters.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ДЕТЕКЦИИ КЛУБНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ YOLO

Газеев Евгений Дмитриевич

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614000, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, gazeeevgenii@yandex.ru

В данной статье исследуется применение свёрточной нейронной сети YOLOv11 для обнаружения клубники на изображениях. Актуальность работы обусловлена возрастающим внедрением искусственного интеллекта в сельское хозяйство, в частности, для автоматизации процессов сбора и сортировки урожая. Для обучения модели был создан собственный набор данных, содержащий изображения кустов клубники с аннотациями плодов и цветов. Обучение проводилось на платформе Google Colab с использованием оптимизированных гиперпараметров. Для оценки качества модели использовались метрики IoU, mAP, mAP50 и mAP50-95. Тестирование модели YOLOv11 проводилось на различных платформах, включая PyTorch, TorchScript, ONNX и TensorRT. Результаты показали, что модель YOLOv11 демонстрирует высокую точность и скорость работы, а также обладает небольшим размером и быстрым временем вывода, что делает её перспективным решением для интеграции в системы технического зрения роботов для сбора урожая.

Ключевые слова: YOLO, искусственный интеллект, сельское хозяйство, машинное обучение, нейронная сеть.

Введение

В различных отраслях наблюдается активное внедрение искусственного интеллекта (ИИ), и этот процесс продолжает набирать обороты. Примерно 25% компаний уже интегрировали ИИ для решения проблемы нехватки рабочей силы [1]. Индустрии инвестируют около 5% своих доходов в развитие генеративного и аналитического ИИ [2], и согласно прогнозам, к концу десятилетия объём мирового рынка технологий искусственного интеллекта может превысить 14 триллионов долларов [3]. Широкое применение ИИ стимулирует компании к интеграции различных нейронных сетей в свои операционные системы [4]. Эта тенденция не обошла стороной и сельскохозяйственный сектор, где искусственный интеллект находит применение в различных областях. Например, некоторые компании используют роботов для сбора урожая клубники и яблок, что способствует повышению уровня автоматизации в растениеводстве. Эта тенденция к автоматизации ферм обещает увеличить урожайность и внести вклад в решение проблем глобальной продовольственной безопасности. В исследовании, проведённом в 2022 году Российским технологическим университетом, было проведено сравнение FasterR-CNN и YOLOv5 [6]. Результаты показали, что YOLOv5 превосходит FasterR-CNN в обработке данных в режиме реального времени, хотя и с некоторыми потерями в точности.

Анализ позволит выявить сильные и слабые стороны самой последней свёрточной нейронной сети YOLOv11 (англ. You Only Look Once). Результаты исследования будут по-

лезны для разработчиков систем компьютерного зрения, заинтересованных в применении YOLO для задач сельского хозяйства, в частности, для автоматизации процессов сбора и сортировки урожая. Цель данной работы является исследование применения свёрточной нейронной сети YOLOv11 для обнаружения клубники на изображениях и оценка её эффективности для автоматизации процессов сбора и сортировки урожая. Работа направлена на определение точности и скорости работы модели YOLOv11 на различных платформах, а также оценку её потенциала для интеграции в системы технического зрения роботов для сбора урожая.

Принцип работы YOLO моделей

Модели YOLO основаны на концепции «одного взгляда», что означает обработку всего изображения за один проход, в отличие от двухэтапных детекторов, которые сначала генерируют предложения областей, а затем классифицируют их [7]. YOLO разделяет изображение на сетку и прогнозирует ограничивающие рамки и вероятности классов для каждой ячейки сетки [7]. Затем применяется подавление немаксимумов (NMS) для фильтрации перекрывающихся обнаружений [7].

Традиционная архитектура YOLO состоит из трех основных частей: Backbone, Neck и Head [7]. Каждая из них отвечает за важные аспекты работы нейронной сети, Backbone позволяет извлекать признаки из входного изображения на различных уровнях детализации, Neck отвечает за агрегацию и уточнение карт признаков, полученных из Backbone, а Head генерирует конечные предсказания модели, используя уточненные карты признаков из Neck.

Различия последней версии YOLO – YOLOv11 от других заключается в том, что в ее архитектуре прошли замены некоторых блоков, что позволило улучшить ее работоспособность [8]. Главное, что изменилось это введение блока C3k2 (англ. Cross Stage Partial with kernel size 2), который заменяет блок C2f, используемый в предыдущих версиях, используя два меньших сверточных слоя вместо одного большого, что повышает скорость и эффективность обработки признаков. Добавление блока C2PSA (англ. Cross Stage Partial with Spatial Attention), позволило улучшить пространственное внимание, позволяя модели сосредоточиться на важных областях изображения. А использование функции активации SiLU (англ. Sigmoid Linear Unit) и улучшенных функций потерь повысило точность обнаружения, особенно при работе с малыми объектами.

Обучающий набор данных

Обучающий набор данных – это фундамент, на котором строится любая модель машинного обучения. Качество и репрезентативность данных напрямую влияют на способность модели обобщать знания и делать точные предсказания на новых, невиданных ранее примерах. В данном исследовании использовался собственный набор данных кустов клубники, как ее плодов, так и цветков [9]. Изначальное количество собранных изображений составляло 4045 единиц, после проведения аугментации (см. табл. 1), позволяющая искусственно увеличить размер набора данных, общее количество изображений возросло до 7048 единиц.

Разделение набора данных на тренировочную, валидационную, тестовую часть составило 6006, 723 и 319 изображений соответственно. Примеры аннотированных изображений из набора данных предоставлены далее (см. рис.).

Проведенные аугментации

Аугментация	Значение
Поворот изображения	Горизонтальный, вертикальный
Угол поворота	От -15° до $+15^\circ$
Сдвиг	$\pm 10^\circ$ по горизонтали, $\pm 10^\circ$ по вертикали
Оттенок	От -5 до +5
Насыщенность	От -30% до +30%
Экспозиция	От -10% до +10%
Размытие	До 1.1 пикселя

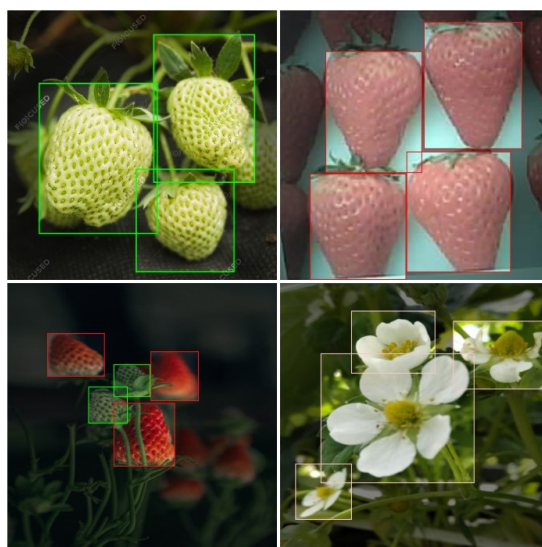


Рис. Примеры изображений

Обучение и критерии оценивания

Для обучения модели была выбрана платформа Google Colab [10]. Google Colab предоставляет бесплатный доступ к вычислительным ресурсам и удобную среду для разработки и экспериментов с моделями машинного обучения. Конфигурация вычислительной машины позволяет обучить среднюю модель YOLO за несколько часов.

Обучение модели машинного обучения требует тщательной настройки множества параметров, называемых гиперпараметрами (см. табл. 2). Правильный выбор гиперпараметров критически важен для достижения оптимальной производительности модели.

Таблица 2

Гиперпараметры

Параметр	Английское название параметра	Значение
Количество эпох	epochs	80
Размер изображение	imgsz	640
Размер пакета	batch	0.85
Оптимизатор	optimizer	AdamW
Момент	momentum	0.9
Скорость обучения	lr (learning rate)	0.001429

В задачах обнаружения объектов, где модель должна не только классифицировать объекты, но и локализовать их на изображении, используются специальные метрики для оценки качества работы. Рассмотрим метрики, которые применяются для оценки нашей модели.

Intersection over Union (IoU) количественно определяет степень совпадения предсказанных и фактических рамок объектов. IoU вычисляется как отношение площади пересечения двух рамок к площади их объединения (см. формулу 1).

$$IoU = \frac{\text{Area of Intersection}}{\text{Area of Union}} \quad (1)$$

Mean Average Precision (mAP) – это метрика, которая вычисляет среднее значение точности (англ. Average Precision, AP) по всем классам объектов (см. формулу 2). Когда Average Precision вычисляется нахождением площади под кривой точности-полноты (precision-recall) (см. формулу 3).

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i \quad (2)$$

$$AP = \int_0^1 \text{precision}(\text{recall})d(\text{recall}) \quad (3)$$

В дополнении к mAP, рассматривается mAP50 и mAP50-95. mAP50 рассчитывает среднюю точность, когда IoU превышает порог в 0.50, это позволяет узнать точность модели на «простых» обнаружениях. mAP50-95 в свою очередь рассчитывает среднюю точность, когда IoU варьируется от 0.50 до 0.95, что дает возможность узнать, как работает модель при различных уровнях сложности обнаружения.

Результаты обучения

Обученная модель YOLOv11 была протестирована на различных платформах с целью определения ее производительности и применимости в реальных системах для автоматизации сельского хозяйства. Ключевые метрики, полученные в результате тестирования, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Ключевые метрики

Формат	Размер (МВ)	mAP50-95 (В)	Время вывода (мс/изображение)	FPS
PyTorch	38.6	0.7614	25.23	39.64
TorchScript	77.1	0.7425	21.42	46.67
ONNX	76.7	0.7425	31.11	32.14
TensorRT	86.2	0.7425	20.39	49.05
TensorFlow SavedModel	192.1	0.7425	40.20	24.87
TensorFlow GraphDef	76.8	0.7425	39.65	25.22
PaddlePaddle	153.3	0.7425	1329.20	0.75
NCNN	76.6	0.7425	1110.28	0.90

Анализ производительности модели YOLOv11, обученной на наборе данных для обнаружения объектов, показал высокие результаты. В частности, метрика mAP50-95 (0.7614) свидетельствует о высокой точности модели в обнаружении плодов и цветов клубники.

Скорость обработки (FPS) также является важным показателем. YOLOv11 демонстрирует высокую скорость до 49.05 FPS при использовании платформы TensorRT, что делает её подходящей для систем, требующих обработки в реальном времени.

Размер модели и время вывода также имеют значение при развёртывании на устройствах с ограниченными ресурсами. YOLOv11 обладает относительно небольшим размером (38.6 МВ в формате PyTorch) и быстрым временем вывода (20.39 мс на платформе TensorRT), что делает её подходящей для мобильных и встраиваемых систем.

Тестирование показало хорошую производительность YOLOv11 на различных платформах, включая PyTorch, TorchScript, ONNX, TensorRT, TensorFlow SavedModel, TensorFlow GraphDef, PaddlePaddle и NCNN. Выбор оптимальной платформы зависит от требований приложения, таких как доступность оборудования, необходимая скорость вывода и размер модели. Например, TensorRT обеспечивает наивысшую скорость вывода, но требует специализированного оборудования. PyTorch и TorchScript предлагают хороший баланс между скоростью и гибкостью, а ONNX обеспечит мобильность модели между платформами.

Заключение

В данной работе была исследована возможность применения свёрточной нейронной сети YOLOv11 для автоматизации детекции клубники на изображениях. Поставленная цель – оценить эффективность YOLOv11 для задач обнаружения клубники и её потенциал для интеграции в робототехнические системы сбора урожая – была достигнута. Тестирование модели YOLOv11, обученной на специально созданном наборе данных, продемонстрировало высокие показатели точности и скорости работы. Достигнутое значение mAP50-95, равное 0.7614, подтверждает высокую точность обнаружения плодов и цветов клубники. Максимальная скорость обработки изображений достигла 49.05 FPS на платформе TensorRT, что соответствует требованиям систем реального времени. Небольшой размер модели (38.6 МВ в формате PyTorch) и быстрое время вывода (20.39 мс на платформе TensorRT) открывают возможности для её использования на мобильных и встраиваемых платформах. Таким образом, результаты исследования подтверждают, что YOLOv11 является перспективным решением для автоматизации задач в сельском хозяйстве, связанных со сбором и сортировкой клубники. Высокая точность и скорость работы, в сочетании с компактностью и эффективностью, делают YOLOv11 подходящим кандидатом для интеграции в системы технического зрения роботов для сбора урожая, что в перспективе может существенно повысить эффективность и снизить затраты на сельскохозяйственные работы.

Библиографический список

1. AI Statistics and Trends in 2024 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hostinger.co.uk/tutorials/ai-statistics#:~:text=Approximately%2025%20of%20companies%20have%20implemented%20AI%20to%20tackle%20labor%20shortages> (дата обращения: 24.10.2024).
2. The state of AI in early 2024 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai#:~:text=The%20latest%20survey,next%20three%20years> (дата обращения: 24.10.2024).
3. Accenture Report [Электронный ресурс]. URL: [https://newsroom.accenture.com/news/2017/accenture-report-artificial-intelligence-has-potential-to-increase-corporate-profitability-in-16-industries-by-an-average-of-38-percent-by-2035#:~:text=The%20introduction%20of%20AI%](https://newsroom.accenture.com/news/2017/accenture-report-artificial-intelligence-has-potential-to-increase-corporate-profitability-in-16-industries-by-an-average-of-38-percent-by-2035#:~:text=The%20introduction%20of%20AI%20will%20transform%20the%20way%20we%20work)

20could%20lead%20to%20an%20economic%20boost%20of%20US%2414%20trillion%20in%20a dditional%20gross%20value%20added%20(GVA)%20across%2016%20industries%20in%2012% 20economies (дата обращения: 24.10.2024).

4. Generative AI Can Democratize Access to Knowledge and Skills [Электронный ресурс]. URL: [https://www.gartner.com/en/articles/generative-ai-can-democratize-access-to-knowledge-and-skills#:~:text=By%202026%2C%20more%20than%2080%25%20of%20enterprises%20will%20have%20used%](https://www.gartner.com/en/articles/generative-ai-can-democratize-access-to-knowledge-and-skills#:~:text=By%202026%2C%20more%20than%2080%25%20of%20enterprises%20will%20have%20used%20) (дата обращения: 24.10.2024).

5. «Умные» фермы: как искусственный интеллект меняет сельское хозяйство [Электронный ресурс]. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/14/06/2023/64802aae9a7947c6121756b7 (дата обращения: 24.10.2024).

6. Тимошкин М.С., Миронов А.Н., Леонтьев А.С. Сравнение YOLO V5 и Faster R-CNN для обнаружения людей на изображении в потоковом режиме [Текст] // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. №ISSN 2227-6017 ONLINE. С. 137–146. DOI: 10.23670/IRJ.2022.120.6.020. EDN: ZFRZRZQ.

7. Terven J., Córdova-Esparza D.M., Romero-González J.A. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. Machine Learning and Knowledge Extraction, 2023, 5(4). Pp. 1680–1716. DOI: 10.3390/make5040083. EDN: XZSDRH.

8. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2410.17725> (дата обращения: 23.10.2024).

9. Strawberry-Flower Dataset [Электронный ресурс]. URL: <https://universe.roboflow.com/noc/strawberry-flower> (дата обращения: 20.10.2024).

10. Google Colab [Электронный ресурс]. URL: <https://colab.research.google.com/> (дата обращения: 20.10.2024).

References

1. AI statistics [Electronic resource]. URL: <https://www.hostinger.co.uk/tutorials/ai-statistics#:~:text=Approximately%2025%25%20of%20companies%20have%20implemented%20AI%20to%20tackle%20labor%20shortages>.

2. The state of artificial intelligence at the beginning of 2024 [Electronic resource]. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai#:~:text=The%20latest%20survey,next%20three%20years>.

3. The report from the Accenture campaign [Electronic resource]. URL: [https://newsroom.accenture.com/news/2017/accenture-report-artificial-intelligence-has-potential-to-increase-corporate-profitability-in-16-industries-by-an-average-of-38-percent-by-2035#:~:text=The%20introduction%20of%20AI%20could%20lead%20to%20an%20economic%20boost%20of%20US%2414%20trillion%20in%20additional%20gross%20value%20added%20\(GVA\)%20across%2016%20industries%20in%2012%20economies](https://newsroom.accenture.com/news/2017/accenture-report-artificial-intelligence-has-potential-to-increase-corporate-profitability-in-16-industries-by-an-average-of-38-percent-by-2035#:~:text=The%20introduction%20of%20AI%20could%20lead%20to%20an%20economic%20boost%20of%20US%2414%20trillion%20in%20additional%20gross%20value%20added%20(GVA)%20across%2016%20industries%20in%2012%20economies).

4. Generative AI can democratize access to knowledge and skills [Electronic resource]. URL: [https://www.gartner.com/en/articles/generative-ai-can-democratize-access-to-knowledge-and-skills#:~:text=By%202026%2C%20more%20than%2080%25%20of%20enterprises%20will%20have%20used%](https://www.gartner.com/en/articles/generative-ai-can-democratize-access-to-knowledge-and-skills#:~:text=By%202026%2C%20more%20than%2080%25%20of%20enterprises%20will%20have%20used%20).

5. “Smart” farms: how artificial intelligence is changing agriculture [Electronic resource]. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/14/06/2023/64802aae9a7947c6121756b7 (In Russian).

6. *Timoshkin M.S., Mironov A.N., Leontiev A.S.* Comparison of YOLOV5 and Faster R-CNN for Detecting People in an Image in Streaming Mode [Text] // International Scientific Research Journal. 2022. No. ISSN 2227-6017 ONLINE. Pp. 137–146 (In Russian).
7. *Terven J., Córdova-Esparza D.M., Romero-González J.A.* A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. Machine Learning and Knowledge Extraction, 2023, 5(4), Pp. 1680-1716.
8. YOLOv11: Overview of key architectural improvements [Electronic resource]. URL: <https://arxiv.org/abs/2410.17725> (accessed: 10/23/2024).
9. Strawberry-Flower Dataset [Electronic resource]. URL: <https://universe.roboflow.com/noc/strawberry-flower>.
10. Google Colab [Electronic resource]. URL: <https://colab.research.google.com>.

AUTOMATION OF STRAWBERRY DETECTION USING THE YOLO NEURAL NETWORK

Gazeev Evgenii D.

Perm State National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky av., Perm, 614000, Russia, gazeevevgenii@yandex.ru

This article explores the application of the YOLOv11 convolutional neural network to detect strawberries in images. The relevance of the work is due to the increasing introduction of artificial intelligence into agriculture, in particular, to automate the processes of harvesting and sorting crops. To train the model, a custom dataset was created containing images of strawberry bushes with annotations of fruits and flowers. The training was conducted on the Google Colab platform using optimized hyperparameters. IoU, mAP, mAP50 and mAP50-95 metrics were used to assess the quality of the model. The YOLOv11 model was tested on various platforms, including PyTorch, TorchScript, ONNX and TensorRT. The results showed that the YOLOv11 model demonstrates high accuracy (mAP50-95 = 0.7614) and operating speed (up to 49.05 FPS), as well as has a small size and fast output time, which makes it a promising solution for integration into the technical vision systems of robots for harvesting.

Keywords: YOLO, artificial intelligence, agriculture, machine learning, neural network.

ПОСТРОЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАМКНУТОМ ПОМЕЩЕНИИ

Гилёв Дмитрий Андреевич, Шкарапута Александр Петрович

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, shkaraputa@psu.ru

Рассматривается применение встраиваемых систем к задаче мониторинга температуры в замкнутом помещении. Несмотря на кажущуюся простоту, решение данной задачи имеет множество трудностей: так, необходимо определить оптимальные места расположения датчиков температуры, установить влияние источников тепла и холода на микроклимат. При исследованиях В работе использована модель, на основе задачи Польшауэна о тепловом пограничном слое. Были проведены натурные эксперименты на применимость этой модели в реальных условиях. Для сбора данных, был разработан программно-аппаратный комплекс. В результате исследования установлены параметры изменения температуры вблизи источников тепла и холода в зависимости от расстояния до этих источников, также дана оценка влияния на распределение температур препятствий, расположенных рядом с ними. На заключительном этапе были сформулированы рекомендации по созданию и применению встраиваемых систем в замкнутых помещениях.

Ключевые слова: мониторинг температуры, встраиваемые системы, задача Польшауэна.

В различных задачах существует необходимость контролировать температуру в разных точках помещения. В течение суток температура даже в замкнутых помещениях может значительно меняться и оказывать влияние, например, на растения, на материалы, а также на животных и людей. С развитием встраиваемых систем появилась возможность располагать датчики в помещениях разного типа, как бытовых, так и производственных (сельскохозяйственных), в связи с этим, стало необходимым определять точки расположения этих датчиков оптимальным образом. Для оптимального расположения датчиков требуется определить источник градиентов температур. Это могут быть стены и окна помещения, нагревательный приборы, бытовые приборы и проч. В данной работе не рассматривались градиенты, имеющие небольшой временной промежуток, например, такие, как изменения температур в следствии открывания-закрывания двери.

Для построения математической модели и ее проверки в результате эксперимента (с помощью разработанной системы мониторинга) была поставлена задача изменения температуры газа в замкнутом контуре, одна из стенок которого имеет температуру отличную от температуры газа внутри.

Подобная задача известна и встречается во многих источниках, и в литературе имеет название «Задача о теплообмене в пограничном слое на вертикальной пластине» (question of boundary layer flow equation with viscous dissipation effect along a flat plate with variable temperature) [1, 2]. Также, постановку этой задачи и ее решение можно найти в источниках

[3, 4]. Задача сводится к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. У нее имеется только численное решение, которое представлено в источнике 4 в безразмерной форме. Это решение было приведено к размерному виду и использовано для сравнения теоретической и экспериментальной оценки распределения температуры у нагретой (холодной) стенки.

Для экспериментальной оценки было сконструировано устройство с отладочной платой Arduino и десятью цифровыми температурными датчиками DS18B20 [5]. На рисунке 1 представлена схема подключения датчиков.

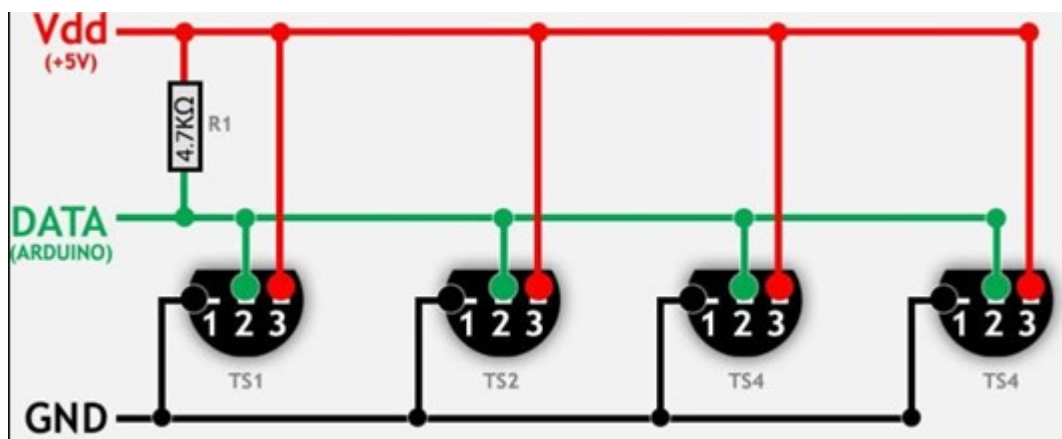


Рис. 1. Оценка температурного распределения в граничном слое

Для более точного замера датчики располагались в одну линию на расстоянии 2 см друг от друга. В качестве реальных источников тепла и холода были взяты такие объекты как окно и батарея тепла.

Измерения вблизи окна

Проведены замеры температуры помещения по заданным параметрам. Температура стенки равна 18°C . Температура в помещении в среднем равна 24.4°C (10% самых отдалённых от окна измерений). Высота, на которых проводилось исследование равно 1.5 метрам. Экспериментальные данные замеров в сравнении с теоретической оценкой представлены на рис. 2.

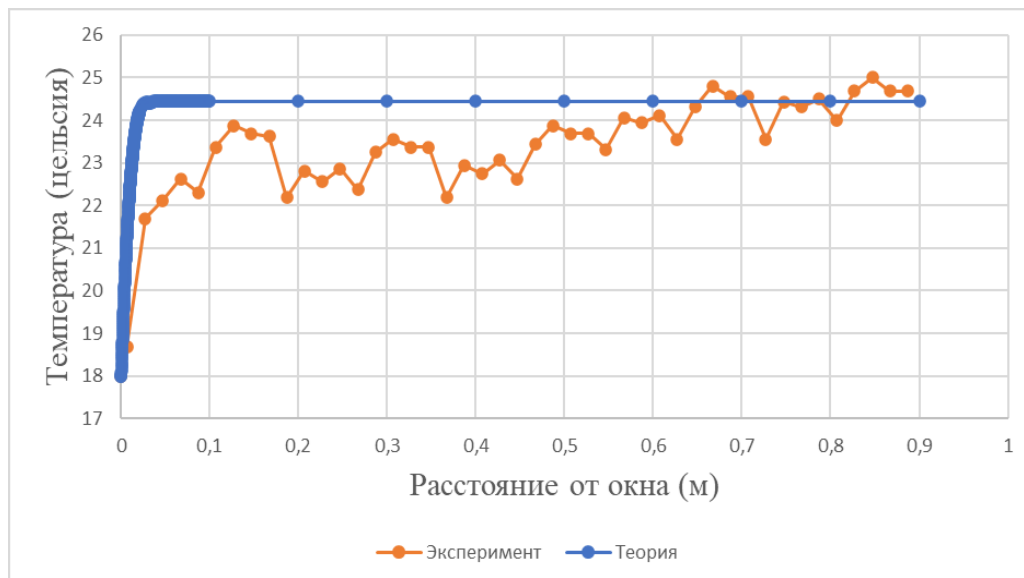


Рис. 2. Распределение температуры вблизи окна

Качественно графики экспериментальной и теоретической зависимости похожи, но теоретическая зависимость температуры в данном случае растёт быстрее реальной, что по всей видимости связано с тем, что в помещении, в котором проводится замер, существовали другие источники холода (тепла), сквозные потоки воздуха, различные препятствия, из-за которых появляются дополнительные завихрения.

Для получения более точной карты температурного распределения вблизи окна был проведен эксперимент, когда устройство располагалось в разных точках перпендикулярно плоскости объекта (рис. 3).

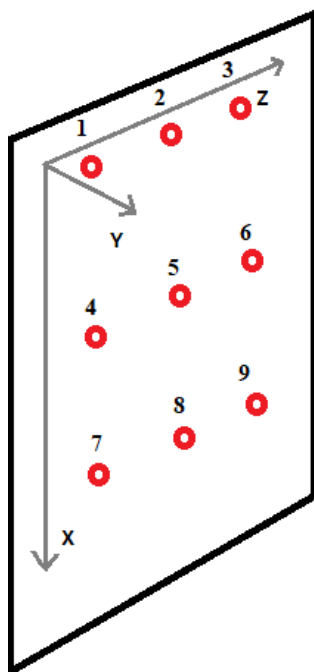


Рис. 3. Пронумерованные точки расположения устройства измерения температуры на плоскости объекта

На рис. 4 изображены поверхности, на которых представлены результаты собранных данных и теоретические предсказания для них.

Существенных отличий в распределении температуры в разных точках замеров не обнаружено, однако на всех экспериментальных зависимостях в районе 0,08 м (или 8 см) от окна обнаружено температурное понижение. Очевидно, что это результат вихревого движения около окна.

Измерения вблизи нагревателя

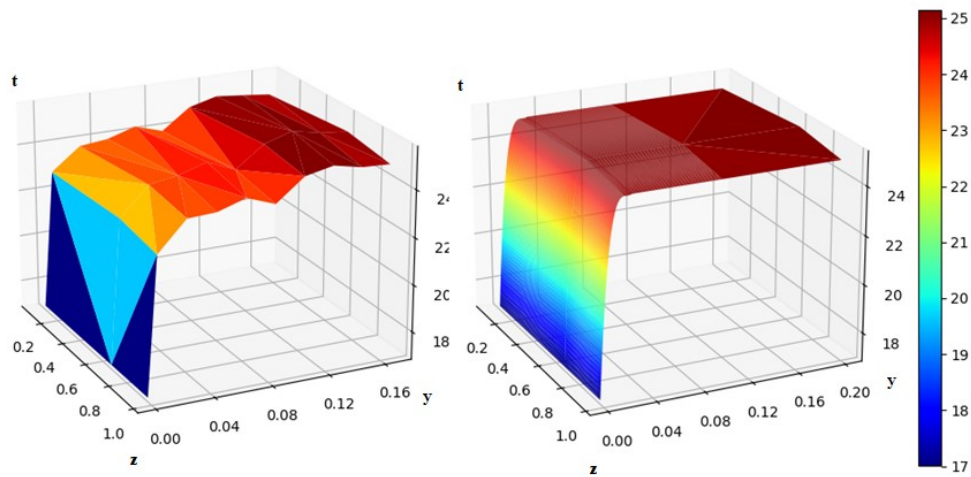
На рисунке 5 представлен результат измерений температуры вблизи нагревательного прибора и сравнение полученного распределения с экспериментальной оценкой.

На графике, так же, как и в случае с окном, видна более крутая теоретическая зависимость по сравнению с экспериментальными данными.

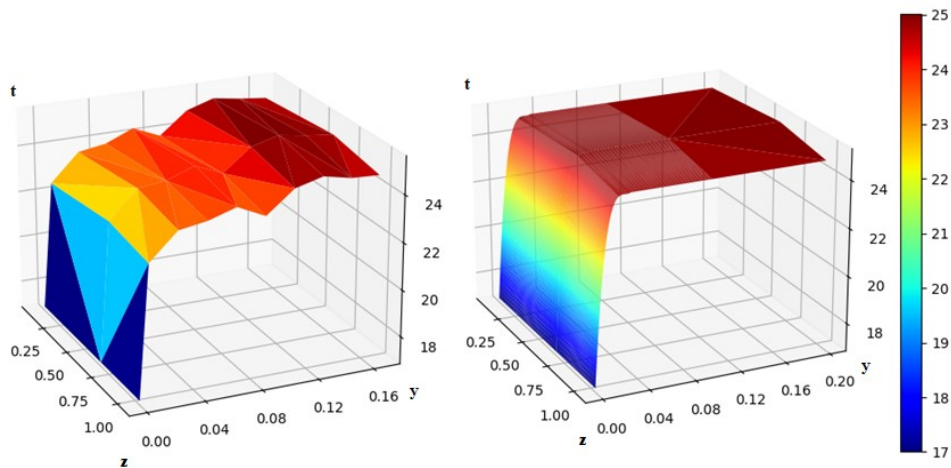
Выводы

В результате использования разработанной встраиваемой системы удалось оценить температурные изменения вблизи холодных и нагретых поверхностей. На основе данных можно составить рекомендации по установке датчиков для мониторинга температуры. Так

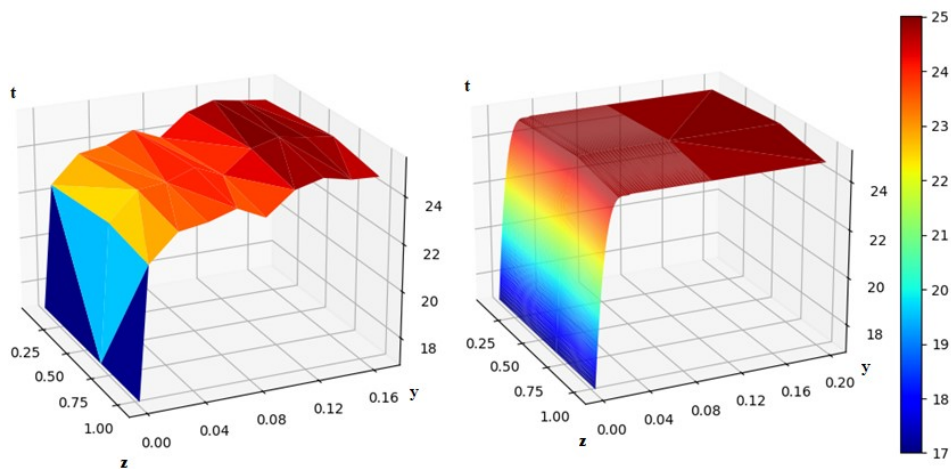
существенные изменения температуры в пограничном слое не превышают 15-ти сантиметров, соответственно, нет смысла устанавливать датчики на большом расстоянии от вертикальных поверхностей.



Замеры в точках 1, 2, 3



Замеры в точках 4, 5, 6



Замеры в точках 7, 8, 9

Рис. 4. Пронумерованные точки расположения устройства измерения температуры на плоскости объекта

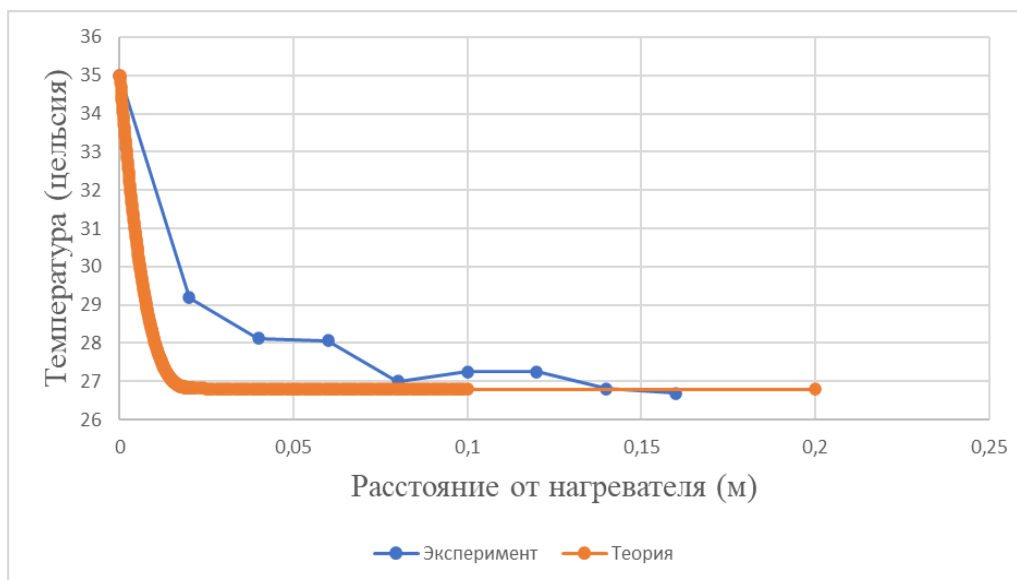


Рис. 5. Распределение температуры вблизи нагревательного прибора

Библиографический список

1. *Satish Desale, V.H. Pradhan.* Numerical solution of boundary layer flow equation with viscous dissipation effect along a flat plate with variable temperature // International Conference on Computational Heat and Mass Transfer-2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/82772738.pdf> (дата обращения: 26.11.2024).
2. *HighExpert.RU* Физические свойства воздуха [Электронный ресурс]. URL: <https://www.highexpert.ru/content/gases/air.html> (дата обращения: 26.11.2024).
3. *Цветков Ф.Ф.* Тепломассообмен: учебное пособие для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. 3-е изд., МЭИ, 2006. С. 221–223.
4. *Шорин С.Н.* Теплопередача // «Высшая школа» – 1964. С. 295–298.
5. *Arduino Master.* Датчик температуры Arduino DS18B20 [Электронный ресурс]. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/arduino-ds18b20>.

References

1. *Satish Desale, V H Pradhan.* Numerical solution of boundary layer flow equation with viscous dissipation effect along a flat plate with variable temperature // International Conference on Computational Heat and Mass Transfer-2015 [Electronic resource]. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/82772738.pdf>.
2. *HighExpert.RU* Physical properties of air [Electronic resource]. URL: <https://www.highexpert.ru/content/gases/air.html> (date of address: 26.11.2024).
3. *Tsvetkov F.F.* Heat and mass transfer: textbook for universities / F.F. Tsvetkov, B.A. Grigoriev. 3rd ed., MPEI, 2006. Pp. 221–223.
4. *Shorin C.N.* Heat transfer // “Higher School” – 1964. Pp. 295–298.
5. *Arduino Master.* Temperature sensor Arduino DS18B20 [Electronic resource]. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/arduino-ds18b20/>.

BUILDING A HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR MONITORING THE STATE OF TEMPERATURE IN A CLOSED ROOM

Gilyov Dmitry A., Shkaraputa Aleksander P.

Perm State University, 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia, shkaraputa@psu.ru

The application of embedded systems to the task of temperature monitoring in a closed room is considered. Despite the apparent simplicity, the solution of this problem has many difficulties: so, it is necessary to determine the optimal locations of temperature sensors, to establish the influence of heat and cold sources on the microclimate. In the research In this paper, a model based on the Pohlhausen problem of the thermal boundary layer was used. Full-scale experiments were conducted on the applicability of this model in real conditions. For data collection, a hardware-software complex was developed. As a result of the study, the parameters of temperature change near heat and cold sources depending on the distance to these sources were established, and the influence of obstacles located near them on the temperature distribution was assessed. At the final stage, recommendations were formulated for the creation and application of embedded systems in enclosed spaces.

Keywords: temperature monitoring, embedded systems, Pohlhausen problem.

ПОСТРОЕНИЕ МЕТРИКИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ТРАЕКТОРНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

Грузликов Александр Михайлович

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,

Россия, 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30, agruzlikov@yandex.ru

Работа посвящена вопросу синтеза метрики для задачи траекторного сопровождения объектов по данным измерения угломерной информации, полученной на антенную решётку гидроакустического комплекса автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) от источника шумоизлучения. По результату приёма сигнала на элементы антенны АНПА, решается задача обнаружения и формирования набора измерений – отметок. Под отметкой понимается вектор наблюдаемых параметров. Задача траекторного сопровождения заключается в объединении последовательности отметок, принадлежащих одному объекту. Для оценки близости отметок предлагается использование сиамской нейронной сети глубокого обучения, которая состоит из двух идентичных нейронных подсетей с одинаковым значением весов. Сиамская нейронная сеть представляет собой нелинейное отображение информации с целью приблизить друг к другу схожие объекты и разнести различные объекты на максимально возможное расстояние. Полученные результаты показали, что использование предлагаемого подхода позволяет существенно повысить качество решения задачи траекторного сопровождения морских объектов.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, гидроакустический комплекс, задача траекторного сопровождения, глубокое обучение, сиамская нейронная сеть.

Введение

Решение задачи траекторного сопровождения объектов является критическим элементом в многочисленных приложениях, например в системах видеонаблюдения при интеллектуальном управлении дорожным движением в городе, в задачах автономной навигации и наведения на заданный объект и т.д. Одной из самых распространённых задач за последние годы, является задача визуального сопровождения объектов с использованием систем технического зрения [1–5].

Задачи, связанные с обнаружением и сопровождением, в значительной степени зависят от степени детализации информации [4], которую система извлекает из текущего измерения. При этом, сопровождение объектов может быть достаточно сложной задачей из-за множества факторов: наличие шума, пересечение (створ) сопровождаемых объектов, наличие ограничений по наблюдению и т.д.

По результату приема входного сигнала на антенну АНПА выполняется решение задачи обнаружения и формирования набора измерений – отметок. Под отметкой понимается вектор наблюдаемых параметров, в том числе пеленгационный рельеф, описывающий пространственную структуру по пеленгу и углам наклона сигнала и случайной помехи [6].

Задача траекторной обработки заключается в объединении последовательности отметок, принадлежащих к одному объекту [1–7]. Для оценки близости отметок предлагается построить метрику на основе сиамской нейронной сети глубокого обучения [8].

В работе приводится описание этапов обработки траектом шумопеленгования и метод синтеза метрики на основе сиамской нейронной сети для оценки близости отметок. Приводится описание архитектуры сиамской нейронной сети и полученные результаты.

Этапы обработки информации траектом шумопеленгования

Традиционно весь процесс обработки информации в гидроакустическом комплексе принято разделять на модули первичной, вторичной обработки [2–3]. *Первичная* обработка заключается в принятии решения о наличии или отсутствии сигнала от объекта шумоизлучения в некотором элементе пространства. Стоит отметить, что наряду с истинными сигналами от источников шумоизлучения, с выхода первичной обработки поступают сигналы и от помехи.

Входными данными для модуля *вторичной* обработки является набор отметок, представляющий вектор измерений, который включает, в том числе информацию по зависимости уровня выходных сигналов в пространственных каналах на интервале наблюдения – пеленгационный рельеф.

Задача синтеза метрики состоит в построении функции, на вход которой поступает информация по двум отметкам, полученным на различных тактах наблюдения. Результат выполнения функции является оценка расстояния, которое в случае принадлежности отметок одному объекту должно быть существенно меньше, чем в случае принадлежности отметок различным объектам (или помехам).

Синтез метрики на основе сиамской нейронной сети

Для решения синтеза метрики воспользуемся разновидностью искусственной нейронной сети, которая состоит из набора идентичных нейронных подсетей с одинаковыми наборами весовых коэффициентов. Данный вид сетей позволяет сравнивать вектора признаков с целью выделения их семантического сходства или различия. Предлагаемый для решения задачи метрики вид сети называется сиамские нейронные сети глубокого обучения (англ. Siamese neural network) [8].

В отличие от традиционных схем машинного обучения с учителем, сиамские сети могут оценивать расстояние между новыми объектами после проведения этапа обучения на других образцах.

Пример архитектуры сиамской сети показан на рис. 1.

Сиамская сеть состоит из двух частей, первая часть предназначена для перевода входной информации (отметки) в пространство признаков и состоит из двух одинаковых сверточных нейронных сетей (англ. Convolutional Neural Networks, CNNs) с общими весами. Другая часть сети предназначена для сравнения признаков, например с использованием Евклидова расстояния:

$$D_w(x_1, x_2) = \|G_w(x_1) - G_w(x_2)\|,$$

где x_1 – результат обнаружения сигнала (отметка) на текущем такте, x_2 – отметка, полученная на предыдущих тактах наблюдения и не принадлежащая ни к одной из траекторий объектов сопровождения, G_w – функция перевода входной информации в признаковое пространство.

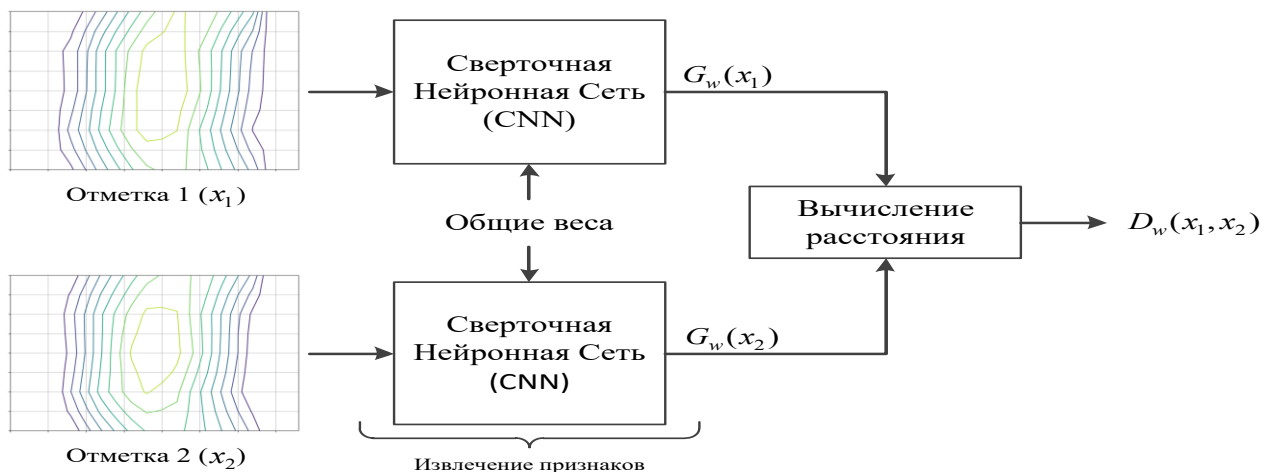


Рис. 1. Архитектура сиамской нейронной сети

Для обучения нейронной сети зададим функцию потерь (англ. contrastive loss function):

$$l(x_i, x_j, y_{i,j}) = (1 - y_{i,j}) D_w(x_i, x_j)^2 + y_{i,j} \max(0, \tau - D_w(x_i, x_j))^2,$$

где $y_{i,j}$ – принимает значение 0, если отметки x_i, x_j принадлежат к одной траектории, иначе $y_{i,j}$ равно 1, τ – заранее заданный предел.

Очевидно, что при обучении сверточной нейронной сети, веса CNN будут подбираться таким образом, чтобы уменьшить расстояние между похожими объектами (в нашем случае, одной траектории источника шумоизлучения) и увеличить расстояние между разными.

Результаты имитационного моделирования

Для проведения обучения сиамской нейронной сети на положительных и отрицательных примерах были разработаны имитационные модели источника шумоизлучения, модель передаточной функции среды, модель антенны и модуль первичной обработки информации.

Имитация состояла в формировании тестовых эпизодов, включая створ объектов, сопровождение морских объектов при интенсивном судоходстве. В общей сложности было сформировано не менее 50000 положительных и отрицательных примеров.

По результату исследования различных архитектур сверточных нейронных сетей, точность сравнения угломерной информации составила 0.8, а точность выполнения модуля вторичной обработки на метрике МОТА [9] составила 0.9 на двух последовательных тактах наблюдения, и почти 1 на трех-четырех тактах, что соответствует выполнению требования по обеспечению уровня ложной тревоги.

Заключение

В работе описан метод синтеза метрики для траекторного сопровождения объектов по угломерной информации. Результаты имитационного моделирования показали, что синтезированная метрика позволяет существенно повысить качество решения задачи траекторного сопровождения морских объектов.

Библиографический список

1. Солонар А.С., Хмарский П.А., Цуприк С.В. Траекторный измеритель координат и параметров движения наземных объектов по данным бортовой оптико-локационной системы // Гирроскопия и навигация. 2023. Т. 31. №3 (122). С. 91–108.
2. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 164 с.
3. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. Ч. 2. 180 с.
4. Bar-Shalom Y., Blair W.D. Multitarget-Multisensor Tracking. Applications and Advances. Vol. 3. London: Artech House, 2000. 608 p.
5. Blackman S., Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. London: ArtechHouse, 1999. 1230 p.
6. Малышкин Г.С., Мельканович В.С. Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике. СПб: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. 268 с.
7. Алпатов Б.А. и др. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
8. Грузликов А.М. Траекторное сопровождение объектов с использованием сиамской нейронной сети глубокого обучения / А. М. Грузликов, В. П. Золотаревич // XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : Материалы мультikonференции. В 4-х томах, Волгоград, 11–15 сентября 2023 года / Редколлегия: И.А. Каляев, В.Г. Пешехонов, С.Ю. Желтов [и др.]. Том 1. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 142–145. – EDN UCZCVL.
9. K. Bernardin, R. Stiefelhagen Evaluating multiple object tracking performance: the clear mot metrics // EURASIP Journal on Image and Video Processing, vol. 2008. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2008/246309. EDN: RRJUWF.

References

1. Solonar A.S., Khmarski P.A. & Tsuprik S.V. Tracking Estimator of the Ground Target Coordinates and Motion Parameters Using Onboard Optical Location System Data // Gyroscopy Navig. 2023 Vol. 31. №3 (122). С. 91–108.
2. Konovalov A.A. Fundamentals of trajectory processing of radar information. SPb: Publ. SPbGETU “LETI”, 2013. 164 c. (In Russian).
3. 3. Konovalov A.A. Fundamentals of trajectory processing of radar information: in 2 parts. SPb: Publ. SPbGETU “LETI”, 2014. Ч. 2. 180 c. (In Russian).
4. Bar-Shalom Y., Blair W.D. Multitarget-Multisensor Tracking. Applications and Advances. V. 3. London: Artech House, 2000. 608 p.
5. Blackman S., Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. London: ArtechHouse, 1999. 1230 p.
6. Malyshkin G.S., Mel'kanovich V.S. Classical and fast projective adaptive algorithms in hydroacoustics. SPb: State Research Center of the Russian Federation JSC “Concern ”TsNII “Elektropryor”, 2022. 268 c. (In Russian).
7. Alpatov B.A. Methods of automatic detection and tracking of objects. Image processing and control. Moscow: Radiotekhnika, 2008. 176 c.(In Russian).

8. *Gruzlikov A.M., Zolotarevich V.P.* Trajectory tracking of objects using Siamese deep learning neural network / A. M. Gruzlikov, V. P. Zolotarevich // XVI All-Russian Multiconference on Control Problems (MKPU-2023) : Materials of the multiconference. In 4 volumes, Volgograd, September 11-15, 2023 / Editorial Board: I.A. Kalyaev, V.G. Peshekhonov, S.Y. Zheltov [and others]. Vol. 1. - Volgograd: Volgograd State Technical University, 2023. - C. 142–145. - EDN UCZCVL. (In Russian).

9. *K. Bernardin and R. Stiefelhagen*, Evaluating multiple object tracking performance: the clear mot metrics // EURASIP Journal on Image and Video Processing, vol. 2008. Pp. 1–10.

CONSTRUCTION OF A METRIC FOR THE PROBLEM OF MARINE OBJECTS TRACING

Gruzlikov Alexander M.

Concern CSRI Elektropribor, JSC,

30, Malaya Posadskaya st., Saint Petersburg, 197046, Russia, agruzlikov@yandex.ru

The paper is devoted to the issue of synthesizing a metric for the problem of trajectory tracking of objects based on the measurement data of angle information received by the antenna array of the hydroacoustic complex of an autonomous unmanned underwater vehicle (AUV) from a noise source. Based on the result of receiving a signal on the AUV antenna elements, the problem of detecting and forming a set of measurements – marks is solved. A mark is a vector of observed parameters. The problem of trajectory tracking consists in combining a sequence of marks belonging to one object. To assess the proximity of marks, it is proposed to use a Siamese deep learning neural network, which consists of two identical neural subnetworks with the same weight value. A Siamese neural network is a nonlinear display of information in order to bring similar objects closer to each other and to spread different objects to the maximum possible distance. The results showed that the use of the proposed approach can significantly improve the quality of the solution to the problem of trajectory tracking of marine objects.

Keywords: autonomous underwater vehicle, hydroacoustic system, multiple object tracking, deep learning, siamese neural network.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ АНПА НА ОС РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Грузликов Александр Михайлович

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,

Россия, 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30, agruzlikov@yandex.ru

Караулов Владислав Германович

Университет ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,

Россия, 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30, vladkar0707@gmail.com

Кораблева Марина Дмитриевна

Университет ЛЭТИ, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,

Россия, 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30,
marinkakd.ru23322@gmail.com

Работа посвящена вопросу определения координат и углов ориентации автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) относительно стационарной посадочной платформы с использованием высокочастотной гидроакустической системы ближнего радиуса действия. Задача навигации предполагает маневрирование аппарата и приближение к платформе, что сопряжено с формированием зон с различной акустической видимостью излучателей станции приёмными элементами аппарата. Определено три основных зоны акустической видимости. Первая зона характеризуется приёмом сигналов от всех маяков и является наиболее информативной. Вторая и третья зона соответствует сокращению числа наблюдаемых маяков. В работе приводится алгоритм решения на вычислительном модуле с ОС реального времени.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, гидроакустическая навигационная система, задача относительной навигации, ОС реального времени, нейронные сети.

Введение. Работа посвящена задаче определения координат и углов ориентации АНПА в интересах решения задачи приведения аппарата к стационарной посадочной платформе [1–3]. Гидроакустическая система АНПА имеет в своем составе приёмные антенны, которые размещаются под килем в кормовой и носовой частях аппарата, а также излучатели, устанавливаемые по краям базы платформы и осуществляющие ненаправленное излучение тонального сигнала. При этом излучение разнесено по времени, что позволяет однозначно идентифицировать источники излучения.

Приведение подводного аппарата предполагает последовательное приближение к платформе, что приводит к необходимости решения задач относительной навигации при различной акустической видимости излучателей приёмными элементами антенн АНПА (рис. 1).

© Грузликов А.М., Караулов В.Г., Кораблева М.Д., 2025

Публикация подготовлена при финансовой поддержке гранта РНФ №23-19-00626. URL: <https://rscf.ru/project/23-19-00626/>.

Можно выделить три зоны видимости приёмниками различных излучателей, которые обусловлены диаграммой направленности излучателей [2, 3]:

- зона 1 – в зоне видимости антенн АНПА находятся все четыре излучателя (рис. 1 а);
- зона 2 – в зоне видимости антенн находятся три излучателя (рис. 1 б);
- зона 3 – в зоне видимости антенн находятся по одному излучателю (рис. 1 в).

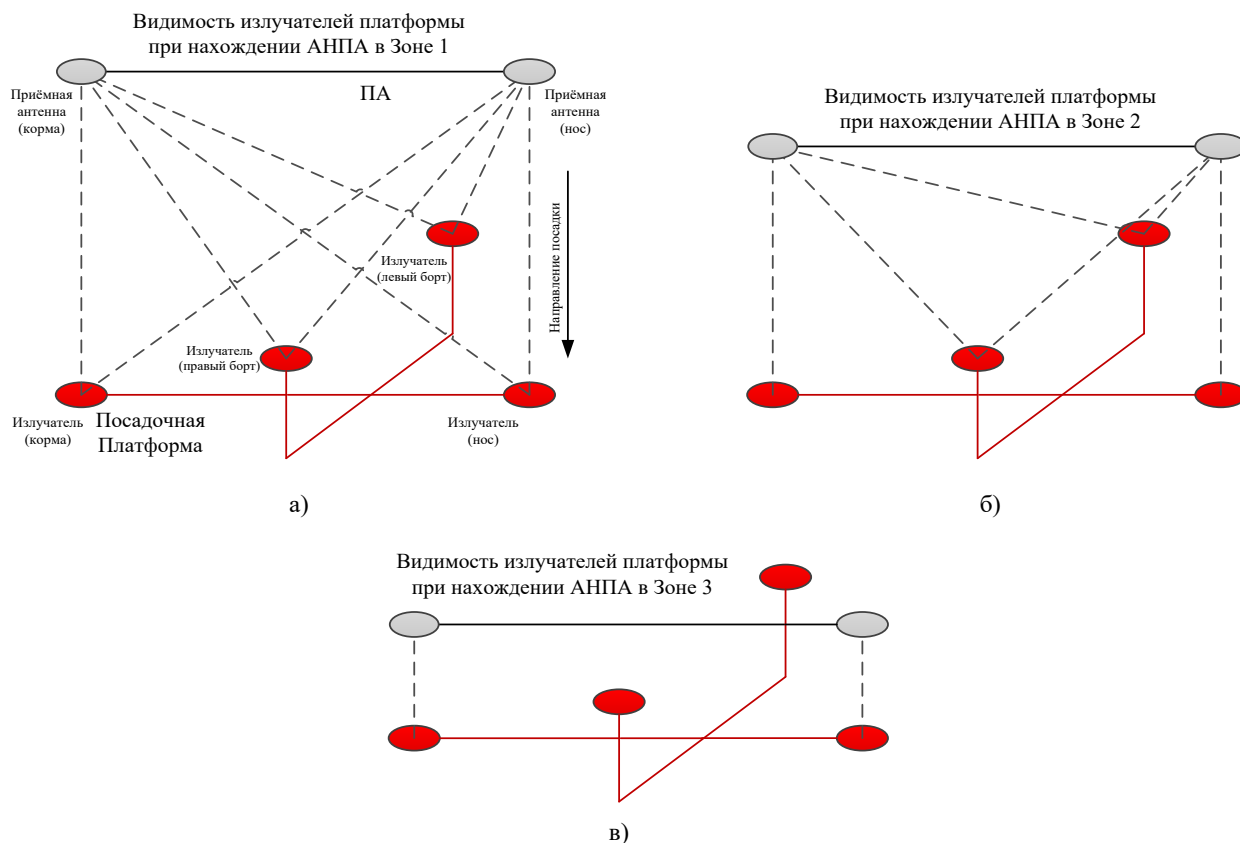


Рис. 1. Зоны видимости излучателей посадочной платформы

Следует отметить, что время излучения сигналов на АНПА является априорно неизвестным, как следствие решение задачи относительной на заключительном этапе (в зоне 3) возможно только при использовании оценки времени излучения полученной в 1 и 2 зоне.

Предлагаемый доклад является продолжением работ авторов [3–5], однако в отличие от предложенных ранее алгоритмов, целью настоящей работы является решение задачи относительной навигации с учётом ограничений по вычислительным ресурсам и памяти ОС реального времени.

Алгоритм решения задачи относительной навигации. При нахождении аппарата в зоне 1 определим следующий двух – этапный алгоритм. На первом, этапе для уменьшения области априорной неопределенности, найдём окрестность координат и углов ориентации АНПА, на втором этапе найдём оценку времени излучения от опорного (например, первого) маяка и скорости распространения звука в среде.

Этап 1. Поиск окрестности координат и углов ориентации. Воспользуемся подходом на основе метода обучения с учителем, где обучающая выборка будет сформирована с использованием решения геометрической задачи на заданной координатной сетке и таблицы углов ориентации (в соответствии с дистанцией распространения сигнала и с учётом характеристики направленности излучателей). В качестве признаков выберем следующие значения:

попарные разницы времён приёма сигнала на гидрофонах АНПА; разница времён приёма сигнала между парами маяков на фиксированном приёмном гидрофоне.

Выбор искомого метода решения определим на этапе моделирования.

Этап 2. Уточнение решения задачи относительной навигации, этап сводится к решению системы алгебраических уравнений с использованием метода наименьших квадратов, где в качестве начального значения задаются координаты и углы ориентации, полученные на первом этапе.

Решение на вычислительном модуле с ОС реального времени. Для поиска решения были рассмотрены различные варианты архитектур нейронной сети, при этом входной слой состоял из 100 нейронов (число входных признаков), выходной из 6 (три координаты и три угла ориентации аппарата). В скрытых слоях были применены функции активации ReLU (Rectified Linear Unit).

По результатам имитационного моделирования была выбрана полносвязная нейронная сеть, состоящая из следующего распределения числа нейронов по слоям: 100 – 500 – 250 – 50.

Для реализации программы на вычислительном модуле под управлением ОС реального времени воспользуемся следующим подходом:

1. создадим нейронную сеть и проведём её обучение с использованием современных библиотек на базе языка программирования python;
2. выгрузим полученную архитектуру и весовые коэффициенты сети в файл;
3. на вычислительном модуле с ОС реального времени, реализуем восстановление архитектуры из файла с использованием конструкций базовых элементов на языке программирования C/C++ реализующих суммирование и функции активации на основе ReLU.

Заключение. В работе кратко описан алгоритм определения координат и углов ориентации АНПА относительно стационарной посадочной платформы. Исследования показали, что предлагаемое решение позволяет решить задачу навигации при приведении АНПА с учетом ограничений при выполнении программы под ОС реального времени.

Библиографический список

1. Кебкал К.Г., Машошин А.И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. №3 (94). С. 115–130. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.3.115-130. EDN: WTPSNR.
2. Кошаев Д.А. Относительное позиционирование и определение ориентации автономного необитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. №4 (119). С. 122–141. DOI: 10.17285/0869-7035.00107. EDN: HQJONJ.
3. Gruzlikov A.M. Short and Ultra-Short Baseline Navigation of the AUV for Bringing It to the Bottom Docking Device, in 2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2022. Pp. 1–3. DOI: 10.23919/ICINS51784.2022.9815380.
4. Грузликов А.М., Караулов В.Г., Мухин Д.А., Шалаев Н.А. Результаты апробации алгоритма позиционирования и определения ориентации подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. №1. С. 265–275. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-265-274. EDN: KJGDVW.
5. Karaulov V.G., Gruzlikov A.M., Zolotarevich V.P. Recursive Algorithm for AUV Positioning and Determining its Orientation, 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). 2023. Pp. 1–4. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168436.

References

1. *Kebkal K.G. and Mashoshin A.I.* AUV acoustic positioning methods. *Gyroscopy and Navigation*, 2017, vol. 8, no. 1. Pp. 80–89. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.3.115-130.
2. *Koshaev D.A.* AUV relative position and attitude determination using acoustic beacons. *Gyroscopy and Navigation*, 2022, no. 13. Pp. 262–275. DOI: 10.1134/S2075108722040083.
3. *Gruzlikov A.M.* Short and Ultra-Short Baseline Navigation of the AUV for Bringing It to the Bottom Docking Device, in 2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2022. Pp. 1–3.
4. *Gruzlikov A.M., Karaulov V.G., Mukhin D.A. and Shalaev N.A.* Results of testing the positioning algorithm and determining the orientation of the underwater vehicle based on data from hydro-acoustic beacons, *Izvestiya YuFu. Tekhnicheskie nauki. Section 4. Communication, Navigation, and Guidance*, 2023. Pp. 265–275. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-265-274 (In Russian).
5. *Karaulov V.G., Gruzlikov A.M., Zolotarevich V.P.* Recursive Algorithm for AUV Positioning and Determining its Orientation, 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). 2023. Pp. 1–4.

SOLVING THE PROBLEM OF RELATIVE NAVIGATION OF AUV ON A REAL-TIME OS

Gruzlikov Alexander M.

Concern CSRI Elektropribor, JSC,
30, Malaya Posadskaya st., Saint Petersburg, 197046, Russia, agruzlikov@yandex.ru

Karaulov Vladislav G.

ITMO University, Concern CSRI Elektropribor, JSC,
30, Malaya Posadskaya st., Saint Petersburg, 197046, Russia, vladkar0707@gmail.com

Korableva Marina D.

LETI University, Concern CSRI Elektropribor, JSC,
30, Malaya Posadskaya st., Saint Petersburg, 197046, Russia,
marinkakd.ru23322@gmail.com

The paper is devoted to the issue of determining the coordinates and orientation angles of an autonomous unmanned underwater vehicle (AUV) relative to a stationary landing platform using a high-frequency short-range hydroacoustic system. The navigation task involves maneuvering the vehicle and approaching the platform, which is associated with the formation of zones with different acoustic visibility of the station's emitters by the vehicle's receiving elements. Three main zones of acoustic visibility are defined. The first zone is characterized by the reception of signals from all beacons and is the most informative. The second and third zones correspond to a reduction in the number of observed beacons. The paper presents an algorithm for solving the problem on a computing module with a real-time OS.

Keywords: autonomous unmanned underwater vehicle, hydroacoustic navigation system, relative navigation problem, real-time OS, neural networks.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СБОРА ОТХОДОВ

Забаиров Алексей Ильдарович, Забалуев Александр Сергеевич,

Орлов Тимофей Сергеевич, Посягин Антон Игоревич

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Россия, 614000, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,

Timofey.O.S@yandex.ru, alexeagerowl@gmail.com,

posyagin.anton@gmail.com, Nore2020@mail.ru

В докладе предлагается создание распределенной роботизированной системы, которая позволит увеличить скорость сбора отходов за счет увеличения количества роботов, исследующих местность и определяющих местоположение отходов на большой площади. Актуальность предлагаемого решения обусловлена большой загрязненностью окружающей среды и постоянным увеличением количества производимых отходов, что приводит к росту возможных негативных эффектов для экологии. В основу исследуемого подхода положен принцип разделения роботов по функциональным возможностям, когда каждая из машин обеспечивает только часть функций всей системы: роботы-поисковики, роботы-сборщики, роботы-доставщики, роботы-курьеры. Представлены структурная схема, а также прототипы механической и управляющей частей роботов для осуществления автоматизированного управления всей системой. Разрабатываемая система отличается отсутствием централизованного управления, когда машины способны самостоятельно принимать решения о траектории движения на местности, основываясь только на данных, полученных от других участников распределенной системы.

Ключевые слова: робот, распределенная система, управление, сбор отходов, модель.

Введение

Сейчас в мире остро стоит проблема загрязнения природных ресурсов вследствие деятельности человека. Один из способов борьбы с загрязнением – это сбор отходов, оставленных человеком. Для решения данных проблем могут использоваться централизованные системы сбора мусора [1, 2]. Одним из недостатков таких систем является не полное использование всех ресурсов робота в каждый момент времени, например, робот «вынужден» перемещать манипулятор для сбора отходов, в том числе во время поиска отходов на местности, даже если они там отсутствуют. Другой недостаток заключается в том, что он имеет крупные габариты, что может затруднять передвижение на захламленной или труднопроходимой местности. Предлагаемая работа посвящена созданию децентрализованной системы с разделением функций между разными классами роботов, специализирующихся на отдельных задачах, и обмену информации между ними посредством радиоканала. Данное решение позволяет осуществлять более эффективное использование ресурсов в пределах одного специализированного робота. Другое преимущество предлагаемой системы в увеличении площади исследуемой территории за счет параллельной работы отдельных компонентов системы, что

позволяет ускорить процесс очистки территории и в то же время увеличить отказоустойчивость системы, когда неисправности в одном из роботов не приводят к отказу всей системы.

Цель работы и полученные результаты

На данном этапе работы основной целью исследования являлась разработка прототипов роботов, которые выполняют основные функции по сбору отходов и отладка алгоритмов их работы в лабораторных условиях. Под лабораторными условиями будем понимать ровную поверхность для передвижения роботов, разделенную на ячейки квадратной формы со стороной 40 см, в которых могут быть расположены препятствия, не позволяющие роботу попасть в данную ячейку, либо условные отходы в виде кубиков, изготовленных из различных материалов. Для достижения поставленной цели необходимо разработать отдельные компоненты системы, среди которых были выделены следующие классы роботов: робот-поисковик для обнаружения отходов и картографирования местности; робот-сборщик, включающий в себя манипулятор для сбора отходов; робот-доставщик, обеспечивающий транспортирование отходов от места сбора на базу; робот-курьер, отвечающий за коммуникацию между остальными частями системы в случае большого удаления их друг от друга. Структурная схема распределенной системы для испытания и сбора метрик производительности решения представлена на рис. 1.

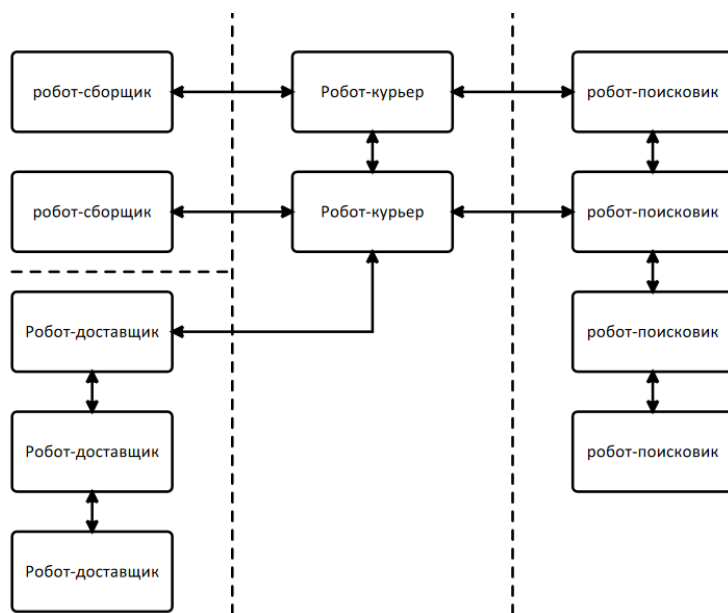


Рис. 1. Структурная схема распределённой роботизированной системы по сбору отходов

Робот-поисковик представляет собой подвижное шасси на гусеничной базе с микрокомпьютером и камерой. Его задача – это создание виртуальной карты местности и передача данной информации другим роботам. Робот-сборщик представляет собой большую гусеничную базу с манипулятором способную поднимать отходы и разгружать их в робота-доставщика. Робот-курьер представляет собой гусеничную ходовую часть с акселерометром и ультразвуковыми датчиками для ориентирования в пространстве [3]. Робот-доставщик представляет собой аналог роботу-курьеру с контейнером для перевозки собранных отходов.

В процессе работы над проектом были созданы прототипы роботов для моделирования процесса сбора отходов с помощью распределенной системы в лабораторных условиях.

Для прототипов была выбрана компонентная база в зависимости от реализуемых задач, а также разработаны функциональные электрические схемы (рис. 2).



Рис. 2. Функциональные электрические схемы прототипов:
 А) Робот-поисковик; Б) Робот-доставщик и робот-курьер; В) Робот-сборщик

Робот-поисковик реализован на базе микрокомпьютера (Raspberry Pi) и камеры «Рыбий глаз» (OV5647). В качестве шасси будет использоваться малое гусеничное шасси (SN800). Робот сканирует местность и строит карту с расположением препятствий и отходов. В условиях моделирования робот расположен на специально подготовленной площадке, ориентирование происходит посредством обнаружения границы сетки и её углов. В качестве отходов в условиях моделирования выступают цветные кубики из различных материалов, расположенные в пределах одной ячейки сетки. Вся информация о местности сохраняется в памяти микрокомпьютера и позже может быть передана другим роботам.

Шасси для робота-сборщика – это большая гусеничная база (TS400) с манипулятором с шестью осями свободы (MOEBIUS 6 DOF Robotic Arm). Задачей робота-сборщика является движение к позиции с условными отходами и сбор посредством манипулятора. Информация о месте положения отходов передаётся вместе с картой от робота-поисковика. По прибытии в точку с отходами производится его подъём и разгрузка в робота-доставщика, при этом робот-поисковик должен находиться рядом с этой клеткой для наведения манипулятора и захвата цели для разгрузки в робота-доставщика.

Робот-доставщик реализован на малой гусеничной ходовой части (SN800) и микроконтроллере (Arduino), а также с применением гироскопа (MPU6050) и ультразвуковых датчиков расстояния (HC-SR04). Робот-доставщик ориентируется на местности при помощи карты, полученной от робота-поисковика и данных с датчиков, определяя своё местоположение и траекторию движения к месту сбора отходов. Основная цель заключается в транспортировке условных отходов от робота-сборщика и ретрансляции карты другим роботам при возможности. Моделирование представляет собой перемещение по сетке с известной картой местности и достижение цели, заданной на карте, избегая препятствий при движении, как обнаруженных в процессе картографирования, так и ранее неизвестных препятствий.

Робот-курьер – это меньшая версия робота-доставщика, предназначенная для создания связи при больших дистанциях. В условиях моделирования на передачу данных были наложены ограничения в виде невозможности передачи карты и другой информации между роботами в моменты, когда расстояние между ними превышает одну ячейку. Коммуникации между роботами происходят посредством радиомодуля (NRF24L01).

Заключение

В результате работы были созданы прототипы компонентов распределённой системы сбора отходов. Для моделирования в лабораторных условиях была выбрана квадратная сетка со стороной ячейки 40 см, картографирование местности производилось посредством робота-поисковика. Данная карта была передана роботу-доставщику и роботу-сборщику с помощью роботов-курьеров. Робот-сборщик и робот-доставщик посредством инерциальной системы позиционирования добрались до положения условных отходов, и робот-сборщик с помощью манипулятора загрузил условные отходы в робота-доставщика. Дальнейшими направлениями исследования являются повышение точности позиционирования инерциальной системы, отработка картографирования на пересечённой местности, создание комплекса по распознаванию объектов на базе нейронной сети.

Библиографический список

1. *Блохина А.С.* Разработка мобильного робота для поддержания чистоты тротуаров, проезжих частей и дворовых территорий в различные временные периоды / А.С. Блохина, К.С. Сычев, О.В. Егоркин // Социально-экономические и технические проблемы оборонно-промышленного комплекса России: история, реальность, инновации: сборник статей по материалам VIII Всероссийской научно-практической конференции, Арзамас, 12–13 апреля 2022 года. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2022. С. 265–269. EDN: CGEDUU.
2. Робот-сортировщик мусора с компьютерным зрением / А.Н. Никулин, С.С. Козина, М.М. Садикова, Д.М. Садикова // Творчество юных: сборник трудов 25-й Региональной научно-практической конференции учащихся, Зеленоград, 24 апреля 2021 года. Том Ч. 1. М.: Издательство "Знание-М", 2021. С. 240–245. EDN: NBOOCZ.
3. *Миков И.И.* Разработка макета для построения и исследования карты пересеченной местности с помощью подвижных агентов / И.И. Миков, И.Д. Харитонов, А.И. Посягин // Автоматизированные системы управления и Информационные технологии: материалы всероссийской научно-технической конференции, Пермь, 07–09 июня 2023 года. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2023. С. 197–203. EDN: EJSMRV.

References

1. *Blokhina A.S.* Development of a mobile robot to maintain the cleanliness of sidewalks, roadways and courtyards at different time periods / A.S. Blokhina, K.S. Sychev, O.V. Egorkin // Socio-economic and technical problems of the military-industrial complex of Russia: history, reality, innovations: Collection of articles based on the materials of the VIII All-Russian scientific and practical conference, Arzamas, April 12–13, 2022. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after. R.E. Alekseeva, 2022. Pp. 265–269. EDN: CGEDUU (In Russian).
2. Computer vision garbage sorting robot / A.N. Nikulin, S.S. Kozina, M.M. Sadikova, D.M. Sadikova // Tvorchestvo yunyh : collection of works of the 25th Regional scientific-practical conference of students, Zelenograd, 24 April 2021. Part 1. M.: Publishing "Znanie-M", 2021. Pp. 240–245. EDN: NBOOCZ (In Russian).
3. *Mikov I.I.* Development of a layout for constructing and exploring a rough terrain map using moving agents / I.I. Mikov, I.D. Haritonov, A.I. Posyagin // Automated control systems and In-

formation technology: Materials of the All-Russian scientific and technical conference, Perm, June 7–9, 2023. Perm: State National Research Polytechnic University of Perm, 2023. Pp. 197–203. EDN: EJSMRV (In Russian).

DISTRIBUTED ROBOTIC WASTE COLLECTION SYSTEM

Zabairov Alexey I., Zabaluev Alexander S., Orlov Timofey S., Posyagin Anton I.

Perm State National Research Polytechnic University,

29, Komsomolsky av., Perm, 614000, Russia,

Timofey.O.S@yandex.ru, alexeagerowl@gmail.com,

posyagin.anton@gmail.com, Nore2020@mail.ru

The report proposes the creation of a distributed robotic system that will increase the rate of waste collection by increasing the number of robots exploring the area and determining the location of waste over a large area. The relevance of the proposed solution is due to the high pollution of the environment and the constant increase in the amount of waste produced, which leads to an increase in possible negative effects on the environment. The approach under study is based on the principle of separating robots by functionality, when each of the machines provides only a part of the entire system: scout robots, collection robots, delivery robots, messenger robots. A block diagram is presented, as well as prototypes of the mechanical and control parts of robots for automated control of the entire system. The system under development is characterized by the absence of centralized control, when machines can independently make decisions about the trajectory of movement on the ground, based only on data received from other participants in the distributed system.

Keywords: robot, distributed system, control, waste collection, model.

РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ МЫШЦ

Коваленко Илья Иванович

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, ilyaandko@ya.ru

Статья посвящена разработке и исследованию искусственных мышц на основе термопластичных полимеров, способных сокращаться под воздействием тепла. Исследование проводилось с целью создания эффективных и доступных искусственных мышц для различных приложений, таких как бионические протезы, робототехника и реабилитационные устройства. В статье были изучены характеристики различных термопластичных полимеров и металлических сплавов, подходящих для изготовления искусственных мышц. Было проведено сравнение свойств полимеров, таких как Нейлон, Капрон, Полиэтилен и Полиэстер, и металлических сплавов, таких как Нихром, Кантал, Инвар и Нержавеющая сталь. Для создания искусственных мышц был разработан метод суперспирализации полимера с отягощением грузом. Изготовлены мышцы в различных структурных формах. Проведены тесты на сокращение искусственных мышц, которые показали, что наиболее эффективной структурой является «Суперспираль» с комбинацией полимеров Капрон и ПНД и металлических сплавов AiSi 321 и Нихром. Результаты исследования позволяют сделать вывод о возможности создания искусственных мышц с высокими показателями сокращения, что открывает перспективы для дальнейших исследований в области бионики, робототехники и реабилитационной медицины.

Ключевые слова: Искусственные мышцы, Термопластичные полимеры, Бионические протезы, Робототехника, Реабилитационные устройства.

Введение

Искусственные мышцы – это материалы или устройства, способные имитировать поведение настоящих мышц, изменяя свою форму под воздействием внешних стимулов. Они могут сокращаться, расширяться или вращаться в пределах одного компонента, реагируя на такие воздействия, как электрический ток, механическое напряжение, изменение давления или температуры [1]. Эта перспективная технология обладает потенциалом для продвижения сфер робототехники, бионики и реабилитационной медицины.

Одной из ключевых задач в этой области является создание искусственных мышц, которые были бы способны имитировать силу, гибкость и энергоэффективность человеческих мышц. Отсутствие таких решений препятствует развитию некоторых технологий, например, таких как:

- бионические протезы конечностей: создавая реалистичные движения, искусственные мышцы могли бы предоставить носителям протезов возможность более естественного и интуитивного взаимодействия с окружающей средой [2]. Протезы с искусственными мыш-

цами могли бы обеспечить не только грубую моторику, но и тонкую моторику, необходимую для выполнения тонких и сложных задач;

- человекоподобные роботы: искусственные мышцы открывают дорогу к созданию роботов с более плавными и естественными движениями [3];
- реабилитационные устройства: искусственные мышцы могут быть использованы для создания реабилитационных устройств, помогающих пациентам с инсультом или другими неврологическими заболеваниями восстановить двигательные функции [4].

Материалы и методы

Для определения ряда подходящих термопластичных полимеров был произведен литературный обзор наиболее распространенных термопластов. Главным образом, целевые полимеры должны были обладать свойством сокращаться под действием высокой температуры, что обуславливалось их кристаллической структурой. В результате обзора были определены кандидаты для дальнейшего исследования: Полигексаметиленадипинамид (Нейлон); Поли-ε-капроамид (Капрон); Полипропилен; Полиэфир (Полиэстер); Полиэтилен; Полистерол; Полиметилметакрилат; Поливинилиденфторид.

В ходе поиска данных полимеров было обнаружено то, что некоторые из них мало распространены на территории РФ, что не давало возможности приобрести их для дальнейших исследований. Эта ситуация привела к тому, что ряд исследуемых полимеров сократился до четырех наименований: Полигексаметиленадипинамид (Нейлон); Поли-ε-капроамид (Капрон); Полиэтилен низкого давления (ПНД); Полиэфир (Полиэстер).

Вышеуказанные полимеры фигурировали в исследованиях с несколькими диаметрами (табл. 1).

Таблица 1

Диаметры полимеров, участвовавших в исследованиях

Наименование полимера	Диаметр, мм				
Нейлон	0,5		0,6	0,8	1,0
Капрон	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
ПНД	0,5		0,7		1,0
Полиэстер	0,148		0,165		0,185

Для приведения мышц в движение необходимо нагревать полимерную нить, для этого предполагалось использование проволок из металлических сплавов с высоким сопротивлением. Помимо способности к быстрому нагреву под действием электрического тока, проволоки должны были обладать большим запасом прочности и достаточной гибкостью, для совершения сжатия.

В ходе литобзора были выбраны четыре сплава, наиболее часто используемых в нагревательных элементах: Нихром; Кантал; Инвар; Нержавеющая сталь. Данные сплавы металлов участвовали в нескольких диаметрах (табл. 2). Для выбранных сплавов металлов были найдены литературные данные об их удельном сопротивлении, проценте относительного удлинения и пределе прочности.

Искусственные мышцы изготавливаются путём суперспирализации полимера с отягощением грузом. Мышцы спирализуются в виде нескольких структурных форм: «Суперспираль» (рис. 1); «Двойная суперспираль» (рис. 2); «Витая суперспираль» (рис. 3).

Диаметры проволок участвовавших в исследованиях

Наименование сплава	Диаметр, мм			
	0,1	0,13	0,16	0,2
Нихром Ni80				
Кантал D	0,1		0,15	0,2
Нержавеющая сталь (AiSi 321)	0,1		0,15	0,2
Инвар	0,2		0,25	

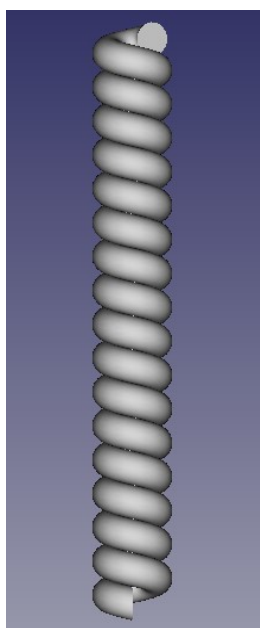


Рис. 1. «Суперспираль»

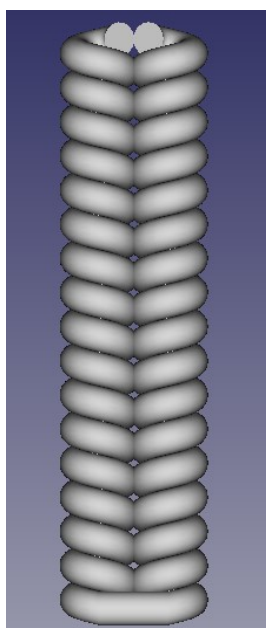


Рис. 2. «Двойная суперспираль»

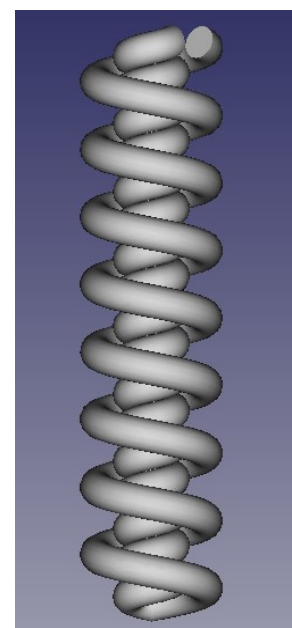


Рис. 3. «Витая суперспираль»

Изготовление искусственных мышц происходит в три стадии: Подготовка материалов; Спирализация; Термофиксация.

Подготовка материалов заключается в нарезке полимеров, нарезке металлической проволоки и их обжимки. Полимеры и проволока нарезаются в одном размере для всех диаметров, затем они складывались так, чтобы их торцы находились вровень друг с другом и обжимались с помощью втулочных наконечников.

Для спирализации наконечники заготовок помещались в два винтовых зажима, к одному из зажимов прикреплялся груз и ограничитель вращения заготовки, второй зажим закреплялся к электродвигателю. Эта конструкция помещалась в камеру с поддерживаемой повышенной температурой.

Спирализация заготовки происходила при температуре воздуха 40-45°C посредством вращения патрона аккумуляторной дрели-шуруповерта по часовой стрелке. Скорость вращения патрона находилась в пределах 200 об/мин. Для структур «Суперспираль» и «Двойная суперспираль» вращение патрона было непрерывно до полной спирализации, для структуры «Витая суперспираль» вращение продолжалось до спирализации половины длины заготовки, затем происходила замена груза для образования витков вокруг основной спирали.

После спирализации заготовки откреплялись от винтовых зажимов и закреплялись на рамках для термофиксации. После закрепления необходимого количества заготовок рамки помещались в сушижаровой шкаф на 60 мин. с температурным режимом, рассчитанным для

каждого отдельного полимера (табл. 3). По истечению 60 мин. рамки извлекались из сушожарового шкафа и остужались до комнатной температуры. Затем один конец заготовок оттягивался на 1/3 длины заготовки и закреплялся на новом месте. Рамки помещались обратно в сушожаровой шкаф на 60 мин. в том же температурном режиме. По истечению 60 мин. рамки извлекались и оставлялись на 24 часа при комнатной температуре.

Таблица 3

Температуры создания и эксплуатации мышц из полимеров

Наименование полимера	Температура плавления, °С	Температура «запекания», °С	Температура эксплуатации, °С
Нейлон	260	180	130
Капрон	215	150	105
ПНД	260	180	125
Полиэстер	135	95	65

Для определения наиболее эффективных форм и комбинаций материалов, используемых в искусственных мышцах, была проведена оценка их способности к сокращению. Степень сокращения оценивалась на стенде с помощью нагрева искусственных мышц посредством нагревания металлической проволоки, протекающим электрическим током. Степень сокращения выражалась в процентном соотношении длины нагретой до рабочей температуры мышцы к её длине в начальном состоянии.

Результаты

В результате тестов была создана таблица (дополнительные материалы) из которой следует то, что наиболее эффективной структурой являлась «Суперспираль» с комбинацией полимеров Капрон и ПНД и металлических сплавов AiSi 321 и Нихром (табл. 4).

Таблица 4

Лидирующие структурные формы и комбинации материалов и их степень сжатия

Структурная форма	Наименование полимера	Диаметр полимера, мм	Наименование сплава	Диаметр проволоки, мм	Степень сжатия, %
«Суперспираль»	Нихром	0,13	Капрон	0,5	27
«Суперспираль»	Нихром	0,1	ПНД	1,0	25
«Суперспираль»	AiSi 321	0,1	ПНД	1,0	24
«Суперспираль»	Нихром	0,1	Капрон	0,5	24
«Суперспираль»	AiSi 321	0,1	Капрон	0,5	23

Заключение

В рамках проведенных исследований и инженерно-конструкторских работ были определены наиболее подходящие для искусственных мышц полимеры, способные сокращаться под действием нагревания, металлические сплавы, отвечающие требованиям к использованию их в комбинации с определенными ранее полимерами, а также разработан метод изготовления таких мышц. В последствии были созданы искусственные металл-полимерные мышцы в различных структурных формах и комбинациях, из которых, в результате проведенных тестов на сократимость, были выбраны 5 наиболее эффективных комбинаций материалов в одной структурной форме.

Библиографический список

1. *Mirvakili S.M. et al.* Niobium nanowire yarns and their application as artificial muscles // *Advanced Functional Materials*. 2013. T. 23. №35. С. 4311–4316. DOI: 10.1002/adfm.201203808.
2. *Herr H.M., Kornbluh R.D.* New horizons for orthotic and prosthetic technology: artificial muscle for ambulation // *Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. SPIE, 2004. Vol. 5385. С. 1–9. DOI: 10.1117/12.544510.
3. *Tondu B.* Artificial muscles for humanoid robots. ed, 2007. DOI: 10.5772/4799.
4. *Aman M. et al.* Bionic hand as artificial organ: Current status and future perspectives // *Artificial organs*. 2019. T. 43. №2. С. 109–118. DOI: 10.1111/aor.13422.

References

1. *Mirvakili S.M. et al.* Niobium nanowire yarns and their application as artificial muscles // *Advanced Functional Materials*. 2013. Vol. 23. №35. Pp. 4311–4316.
2. *Herr H.M., Kornbluh R.D.* New horizons for orthotic and prosthetic technology: artificial muscle for ambulation // *Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. SPIE, 2004. Vol. 5385. Pp. 1–9.
3. *Tondu B.* Artificial muscles for humanoid robots. ed, 2007. DOI: 10.5772/4799.
4. *Aman M. et al.* Bionic hand as artificial organ: Current status and future perspectives // *Artificial organs*. 2019. Vol. 43. №2. Pp. 109–118.

DEVELOPMENT OF METAL-POLYMER ARTIFICIAL MUSCLES

Kovalenko Ilya I.

Perm State University, 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia, ilyaandko@ya.ru

The article is dedicated to the advancement and investigation of artificial muscles based on thermoplastic polymers with the capacity to contract in response to heat. The objective of the research was to develop efficient and cost-effective artificial muscles for a range of applications, including bionic prostheses, robotics, and rehabilitation devices. The paper examined the characteristics of various thermoplastic polymers and metal alloys that are suitable for the fabrication of artificial muscles. The characteristics of polymers, including nylon, capron, polyethylene, and polyester, and of metal alloys, such as nichrome, Kanthal, Invar, and stainless steel, were compared. A method of super-spiralization of the polymer with weight-loading has been developed for the creation of artificial muscles. A variety of structural forms for muscles were fabricated and tested. The contraction of artificial muscles was observed, and the results demonstrated that the most effective structure is the “superspiral”, which combines Capron and HDPE polymers with AiSi 321 and Nichrome metal alloys. The findings of this study indicate that it is feasible to create artificial muscles with high contraction rates, which paves the way for further research in the domains of bionics, robotics, and rehabilitation medicine.

Keywords: Artificial muscles, Thermoplastic polymers, Bionic prostheses, Robotics, Rehabilitation devices.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОПРИВОДОМ С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ ДЛЯ ПОВОРОТНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ

Лазарев Вячеслав Александрович, Иванов Павел Алексеевич

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

имения В.И. Ульянова (Ленина),

Россия, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5,

lazarevvy4eslav@yandex.ru, ivanov_etu@mail.ru

В работе предложен вариант системы управления сервоприводами поворотного испытательного стенда, где динамическое изменение моментов инерции полезной нагрузки компенсируется адаптивными алгоритмами перенастройки этой системы, что приводит к сохранению и поддержанию заданных параметров качества управления движением.

Ключевые слова: поворотный испытательный стенд, система управления сервоприводом, частотные характеристики системы, параметрическая адаптация.

В настоящее время для калибровки и испытания инерциальных чувствительных элементов используются поворотные испытательные стенды, способные с заданной точностью воспроизводить и измерять угловые положения планшайбы (на которую устанавливается объект испытаний) относительно одной или нескольких взаимно-перпендикулярных осей [1, 2]. Для воспроизведения соответствующих движений в структуре стендов обычно используются следящие сервоприводы на основе бесколлекторных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов с обратной связью по инкрементному или абсолютному датчику угла [3, 4].

Сохранение заданного качества управления движением планшайбы при различных массогабаритных характеристиках объекта испытаний достигается за счёт перенастройки системы управления под текущие параметры нагрузки (параметрическая адаптация), что увеличивает время испытания и делает его более трудозатратным. Предложен способ автоматизированной параметрической адаптации системы управления сервоприводами поворотного испытательного стенда под текущий момент инерции полезной нагрузки. Идентификация данного момента инерции основана на дополнительной обратной связи от датчика тока сервопривода при равнопеременном вращении планшайбы стенда. В работе проведено исследование частотных характеристик контура управления скоростью вращения планшайбы стенда при различных значениях моментов инерции полезной нагрузки. Показано, что система управления сервоприводами с автоматизированной параметрической адаптацией позволит расширить допустимый диапазон моментов инерции полезной нагрузки с сохранением и поддержанием заданных параметров качества управления движением.

©Лазарев В.А., Иванов П.А., 2025

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант №20-19-00412-П.

Библиографический список

1. *Иванов П.А., Лазарев В.А., Бохман Е.Д., Павлов П.А., Филатов Ю.В.* Исследование характеристик трехосного стенда для испытаний навигационных систем // Гироскопия и навигация. Т. 30, №3 (118), 2022. DOI: 10.17285/0869-7035.00100. EDN: KOPARD.
2. *Боронахин А.М., Иванов П.А., Бохман Е.Д., Филатов Ю.В., Суров И.Л.* Средства испытаний инерциальных систем и их чувствительных элементов // Материалы XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ.
3. *Балковой А.П., Цаценкин В.К.* Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издат. Дом МЭИ, 2010. ISBN: 978-5-383-00457-9. EDN: QXSHYA.
4. *Самыгина Е.К.* Сравнение линейных алгоритмов управления положением для прямых сервоприводов / Е.К. Самыгина, Л.Н. Рассудов, А.П. Балковой // Вестник Московского энергетического института. 2019. №2. С. 57–64. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-57-64. EDN: ZBLXEL.

References

1. *Ivanov P.A., Lazarev V.A., Bokhman E.D., Pavlov P.A., Filatov Y.V.* Investigation of the characteristics of a three-axis stand for navigation systems // *Giroskopiya I navigatsiya*. Vol. 30, No. 3 (118), 2022 (In Russian).
2. *Boronakhin A.M., Ivanov P.A., Bokhman E.D., Filatov Yu.V., Surov I.L.* Means of testing inertial systems and their sensitive elements // *Materialy XVIII Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konferencii po integrirovannym navigacionnym sistemam*. SPb: GNC RF CNII (In Russian).
3. *Balkov A.P., Tsatsenkin V.K.* Precision electric drive with valve motors. M: Izdat. Dom MEI, 2010 (In Russian).
4. *Samygina E.K.* Comparison of linear position control algorithms for direct servos / E.K. Samygina, L.N. Rassudov, A.P. Balkova // *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*, 2019. №2. Pp. 57–64 (In Russian).

DEVELOPMENT OF A SERVO CONTROL SYSTEM WITH PARAMETRIC ADAPTATION FOR ROTARY TEST STANDS

Lazarev Vyacheslav A., Ivanov Pavel A.

Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”,
5, Professora Popova st., St. Petersburg, 197022, Russia,
lazarevvya4eslav@yandex.ru, ivanov_etu@mail.ru

The paper proposes a variant of the servo control system of a rotary test bench, where the dynamic change in the moments of inertia of the payload is compensated by adaptive algorithms for reconfiguring this system, which leads to the preservation and maintenance of the specified parameters of the quality of motion control.

Keywords: rotary test bench, servo control system, frequency characteristics of the system, parametric adaptation.

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ ЭКЗОСКЕЛЕТАМИ

Маслова Ксения Сергеевна

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 17, стр.1,
maslowaksusha1@yandex.ru

В статье рассматриваются особенности интеллектуальных систем управления роботизированными экзоскелетами антропоморфного типа, области применения роботизированных систем. Представлена схема комбинированного управления активными экзоскелетами. Актуальность внедрения интеллектуального управления в роботизированные системы в том, что это позволит системе автоматически выбирать протокол контроля движения для адаптации пользователя экзоскелета к условиям неопределенности окружающей среды. Рассмотрены перспективы использования машинных методов обучения, их основное преимущество в возможности увеличения масштаба задач без существенной потери качества их решения за счет адаптивности модели, обучающейся на большом объеме входных данных. Представлен оптимальный метод, позволяющий оптимизировать работу системы интеллектуального управления и критерии оценки его качества. Проведен анализ систем интеллектуального управления и выявлены параметры для обеспечения работы роботизированной системы экзоскелета, необходимые для компенсации и минимизации внешних воздействий при любых изменениях окружающей среды.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, роботизированная система, методы машинного обучения, экзоскелет.

Роботизированная система представляет собой механическую структуру, включающую в себя элементы управления, систему внутренней коммуникации, приводы, датчики. Данные интеллектуальные устройства позволяют оптимизировать процессы как производственных, так и бытовых масштабов. Они могут сокращать время цикла выполнения операций, повышать эффективность выполнения задач, выполнять тяжелые работы, заниматься мониторингом и управлением систем. Обучаемые интеллектуальные системы управления в роботизированных системах позволяют расширять спектр решаемых задач, адаптировать устройства к неопределенным условиям и повышать точность принимаемых решений и прогнозов, позволяющих оптимизировать процессы.

Спектр применения роботизированных систем не ограничивается умными устройствами, но и позволяет использовать их даже в медицине в целях реабилитации пациентов с нарушениями в работе опорно-двигательного аппарата посредством использования активных экзоскелетов.

Управление большинством моделей экзоскелетов происходило по схеме, представленной на рисунке.



Рис. Схема комбинированного управления моделями экзоскелетов

Входные данные представляются в виде уравнения движения и обрабатываются системой управления. Далее на основе результатов решения происходит требуемое действие. Оценка качества готовой модели экзоскелета и обратная связь, идущая на блок управления, позволяет совершенствовать систему.

Обработка большого количества входных параметров является достаточно сложной задачей, поэтому актуально введение интеллектуального управления в антропоморфных экзоскелетах. Это позволит автоматически выбирать протокол контроля движения для адаптации пользователя к условиям неопределенности окружающей среды [1].

Основным методом для совершенствования интеллектуальных систем является машинное обучение. Потенциал данного типа обучения программ заключается в применении в ходе обучения большого количества схожих задач, вместо прямого пути решения одной конкретной задачи. Таким образом, у разработчика отсутствует необходимость постоянно задавать инструкции и регулировать выполнение задачи. Среди методов машинного обучения выделяют классическое обучение (с учителем или без учителя), обучение с подкреплением, ансамблевые методы, нейросети и глубокое обучение [2].

Основная особенность машинного обучения в тех задачах, которые становится возможным решить при его помощи. Обучение программы происходит на основе данных об опыте, который получен в результате работы над определенным классом задач, с учетом меры качества, которая возрастает прямо пропорционально росту опыта. Использование данных для обучения, состоящих из набора примеров, облегчают задачу обучения. В результате при машинном обучении программы создается обобщающая математическая модель, которая способна в не идеальной, но достаточной мере описать примеры данных в виде конкретных признаков. Признаки в модели используются для дальнейшего составления прогнозов или классификаций. Для обучения систем интеллектуального управления роботизированной системой экзоскелета возможно использование обучения с учителем или обучение с подкреплением. В таком случае, обучаемая модель может способствовать автоматизации задач регрессии. Решение задачи регрессии позволяет предсказывать будущие значения на основе предыдущих входных данных, например при расчете оптимальной силы подачи тока на элемент управления при учете входящих параметров и требуемых характеристик движения на выходе.

Важное преимущество методов машинного обучения состоит в возможности увеличения масштаба задач без существенной потери качества их решения за счет адаптивности модели, обучающейся на большом объеме входных данных. Обработка и анализ большого объема входящей информации позволяет обучаемым программам определять существующие в данных закономерности и на их основе составлять модели, при помощи которых становится возможным построение прогнозов дальнейшего развития. После обучения модели необхо-

можно произвести тестирование для объективной оценки результатов и производительности. Развитие методов машинного обучения позволяет улучшить качество технической, медицинской диагностики, финансового анализа, распознавания поступающей информации (речевой, жестовой, образной, рукописной). Также задачи по распределению на необходимые категории большого объема документации, ранжированию информации по заданным критериям в информационном поиске, прогнозированию будущих значений необходимых характеристик.

При подготовке данных для машинного обучения интеллектуальной системы управления роботизированным объектом, в рамках данной работы рассматриваем под таким объектом антропоморфный экзоскелет, важно обратить особое внимание на подготовку данных для обучения программы. Качество данных напрямую влияет на точность прогнозирования возможных отклонений при работе конструкции экзоскелета. Недопустимо допускать пропуски значений, обобщение разных типов данных, а также кодирование признаков категории, они должны быть приведены к числовому выражению, чтобы интеллектуальная система могла их обработать. Несоблюдение данных требований может негативно повлиять на работоспособность экзоскелетов в процессе использования.

Качество системы интеллектуального управления является интегральным показателем. Для его оценки на этапе построения модели качества определяется представительный набор существенных характеристик и субхарактеристик на основе назначения системы [3].

Для реабилитационных экзоскелетов, работающих от электродвигателей, которые подстраивают свое движение под потребности пользователя, актуально использование программного обеспечения с интеллектуальным управлением [4]. Значительно повысить качество управления позволяет машинное обучение по типу обучения с подкреплением. Отталкиваясь от точной модели скелета и мышечных креплений пользователя, нейросеть в ходе симуляции движения может обучиться основным паттернам движения, что позволит экзоскелету стать успешным проводником между мышечной опорно-двигательной системой пользователя и окружающей средой [5]. За счет изменения силы подаваемого на двигатель тока, происходит компенсация факторов неопределенности окружающей среды. Условиями, создающими неопределенность окружающей среды, могут быть неопределенные размеры объектов, попадающих на путь движения, их непредсказуемое изменение положения в пространстве и динамичность окружающей среды, ограниченность времени на принятие решений скоростью движения. Система интеллектуального управления должна стремиться к обеспечению работы роботизированной системы экзоскелета при любых изменениях окружающей среды, компенсировать и минимизировать внешние воздействия.

Библиографический список

1. *Blinov A.O.* Using neural-fuzzy inference to control the functioning of a human-machine system in the form of an exoskeleton with links of variable length, taking into account the effects of lag and synchronization of electric drives / A.O. Blinov, V.O. Blinov, M.G. Kulikova, K.S. Maslova // Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023), Dushanbe, 25-27 октября 2023 года. Vol. 12986. Washington: SPIE-SOC PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS, 2024. P. 129860Y. DOI: 10.1117/12.3017812. EDN: TZJBAQ.

2. *Пучков А.Ю.* Применение глубоких нейронных сетей в моделях сложных технологических объектов / А.Ю. Пучков, М.И. Дли, Е.И. Лобанева // Известия Санкт-Петербургского

государственного технологического института (технического университета). 2020. №52 (78). С. 104–110. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-52-78-104-110. EDN: QUJKDP.

3. ГОСТ Р 59898-2021. Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения.

4. *Борисов А.В.* Математическое моделирование мягкого экзоскелета из магнитно-реологических модулей с интеллектуальным управлением / А.В. Борисов, А.В. Чигарев, Ю.А. Чигарева, Л.В. Кончина // Прикладная информатика. 2024. Т. 19, №3 (111). С. 47–70. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-3-47-70. EDN: CQKDAH.

5. *Sh. Luo* Experiment-free exoskeleton assistance via learning in simulation / Sh. Luo, M. Jiang, S. Zhang [et al.] // Nature. 2024. Vol. 630, No. 8016. Pp. 353–359. DOI: 10.1038/s41586-024-07382-4. EDN: ESRPXQ.

References

1. *Blinov A.O.* Using neural-fuzzy inference to control the functioning of a human-machine system in the form of an exoskeleton with links of variable length, taking into account the effects of lag and synchronization of electric drives / A.O. Blinov, V.O. Blinov, M.G. Kulikova, K.S. Maslova // Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023), Dushanbe, 25–27 october 2023. Vol. 12986. Washington: SPIE-SOC PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS, 2024. Pp. 129860Y. DOI: 10.1117/12.3017812. EDN: TZJBAQ.

2. *Puchkov A.Yu.* Application of deep neural networks in models of complex technological objects / A.Yu. Puchkov, M.I. Dli, E.I. Lobaneva // Proceedings of St. Petersburg State Technological Institute (Technical University). 2020. №52 (78). С. 104–110. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-52-78-104-110. EDN: QUJKDP. (In Russian).

1. ГОСТ Р 59898-2021. Quality assessment of artificial intelligence systems. General provisions. (In Russian).

2. *Borisov A.V.* Mathematical modeling of the soft exoskeleton from the magnetic-rheological modules with intellectual control / A.V. Borisov, A.V. Chigarev, Y.A. Chigareva, L.V. Konchina // Applied Informatics. 2024. Т. 19, №3 (111). С. 47–70. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-3-47-70. EDN: CQKDAH. (In Russian).

1. *Sh. Luo* Experiment-free exoskeleton assistance via learning in simulation / Sh. Luo, M. Jiang, S. Zhang [et al.] // Nature. 2024. Vol. 630, No. 8016. Pp. 353–359. DOI: 10.1038/s41586-024-07382-4. EDN: ESRPXQ.

FEATURES OF INTELLIGENT CONTROL OF ROBOTIC EXOSKELETONS

Maslova Kseniia S.

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,

17, build. 1, Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russia,

maslowaksusha1@yandex.ru

The article discusses the features of intelligent control systems for robotic exoskeletons of anthropomorphic type, the scope of application of robotic systems. A scheme of combined control of active exoskeletons is presented. The relevance of implementing intelligent control in robotic systems

is that it will allow the system to automatically select a motion control protocol to adapt the exoskeleton user to environmental uncertainty. The prospects of using machine learning methods are considered, their main advantage is the possibility of increasing the scale of tasks without significantly losing the quality of their solution due to the adaptability of the model, which is trained on a large amount of input data. The optimal method is presented to optimize the operation of the intelligent control system and the criteria for evaluating its quality. The analysis of intelligent control systems has been carried out and the parameters for ensuring the operation of the robotic exoskeleton system necessary to compensate and minimize external influences in any environmental changes have been identified.

Keywords: intelligent control, robotic system, machine learning methods, exoskeleton.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННОЙ СХЕМЫ РОБОТА-МОНОЦИКЛА, ПРИВОДИМОГО В ДВИЖЕНИЕ ПОСТУПАТЕЛЬНЫМИ ПАРАМИ

Миронов Велимир Владимирович

ООО «Бриз», 192236, г. Санкт-Петербург, ул. Софийская, 8,
корп. 1, стр. 1, пом. 18-Н, офис 309/2, velimir.mironov@gmail.com

В данной работе представлена конструктивная схема автономного робота-моноцикла, приводимого в движение поступательными приводами. В ходе выполнения работы была разработана кинематика для робота-моноцикла, передвигающегося по плоской горизонтальной поверхности без использования кинематических пар (КП) вращения и вращательных приводов. Для определения геометрии кинематической модели предложены методы для подбора параметров звеньев механизма с помощью CAD-программы Компас-3D. Для определения динамической модели предложен метод подбора необходимых силовых параметров приводов, в данном случае подбиралась сила в поступательной кинематической паре. Для удовлетворения динамическим условиям заданной модели сила в КП должна быть не менее 0.3 Н. Для проверки модели спроектирован и реализован в виде лабораторного образца прототип устройства с диаметром 120 мм, массой около 0.6 кг, крутящим моментом 1.78×10^{-3} Нм и автономным передвижением. Проверка прототипа показала работоспособность предложенной конструктивной схемы.

Ключевые слова: кинематическая схема, конструктивная схема, моноколесный робот, моноцикл, поступательные приводы.

Введение

Робот-моноцикл – это робот, передвижение которого осуществляется с помощью одного колеса. Для быстрого передвижения по плоским поверхностям могут использоваться моноциклы различной конструкции. Приведение в движение моноциклов обычно реализуется за счет различных конструктивных схем с вращательными кинематическими парами и вращательными приводами [1]. Такие схемы предполагают сложные механизмы балансировки и передачи крутящего момента [2]. Однако они не всегда являются целесообразными в использовании и могут быть нестабильны, а система управления нелинейна [3]. В данной работе предложена альтернативная конструктивная схема, в основе которой лежат простейшие поступательные актуаторы, которые могут обладать хорошим потенциалом к масштабированию. Рассмотрена кинематическая схема с использованием только поступательных пар, а также предложен вариант подбора необходимых геометрических и силовых характеристик. Примеры приведены для устройства диаметром 120 мм, но по аналогии применимы для любой системы с ньютоновской механикой.

Материалы и методы

Для разработки использовались CAD-программы: для схем – Компас-График, для 3D моделирования – Компас-3D. Детали прототипа изготавливались с использованием филамента PETG на FDM 3D-принтере, контролируемым программой Bambu Studio. В качестве движущего устройства использовались соленоидные приводы модели JF-0520B с номиналь-

ным напряжением питания 12 В. Программа управления написана на языке C++ в среде Arduino IDE.

Кинематическая схема

Полученная кинематическая схема представлена на рис. 1. Далее рассмотрено определение необходимых параметров: угловой шаг a и ход штоков h .

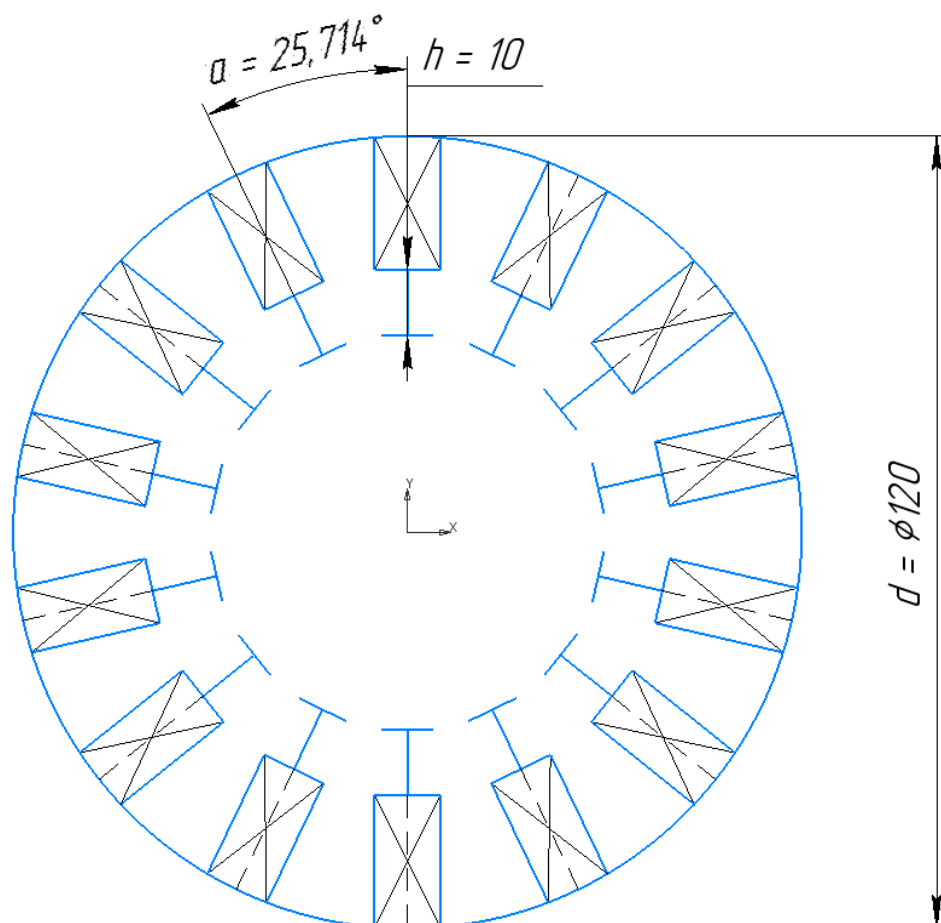


Рис. 3. Кинематическая схема робота

Так как модель изготавливалась с использованием стандартных соленоидных приводов модели JF-0520B, то ход штока был взят из документации от поставщика [4]: $h = 10$ мм. Далее был подобран угловой шаг a :

1. Подбирается a так, чтобы при полном выдвижении штока опорная точка была опущена ниже условного уровня опорной поверхности (рис. 2), полученное число a должно быть делителем 360 градусов;

2. Схему повернули вокруг центра (начала координат) так, чтобы опорная точка оказалась на поверхности (рис. 3). После полного выдвижения штока привода и поворота робота на 5.3 градусов включается следующий привод, и опорная точка его штока начинает отталкиваться от поверхности. В нашем случае угол поворота робота $b = 5.3$ градусов, а плечо силы для следующего привода $l_2 = 5.6$ мм. Полученное значение мало, но уменьшить угол a не представляется возможным с выбранными актуаторами, что будет показано ниже. Стоит отметить, что в ходе подбора получено оптимальное значение $a = 20$ градусов для данной схемы, но после проверки в 3D это значение пересмотрено.

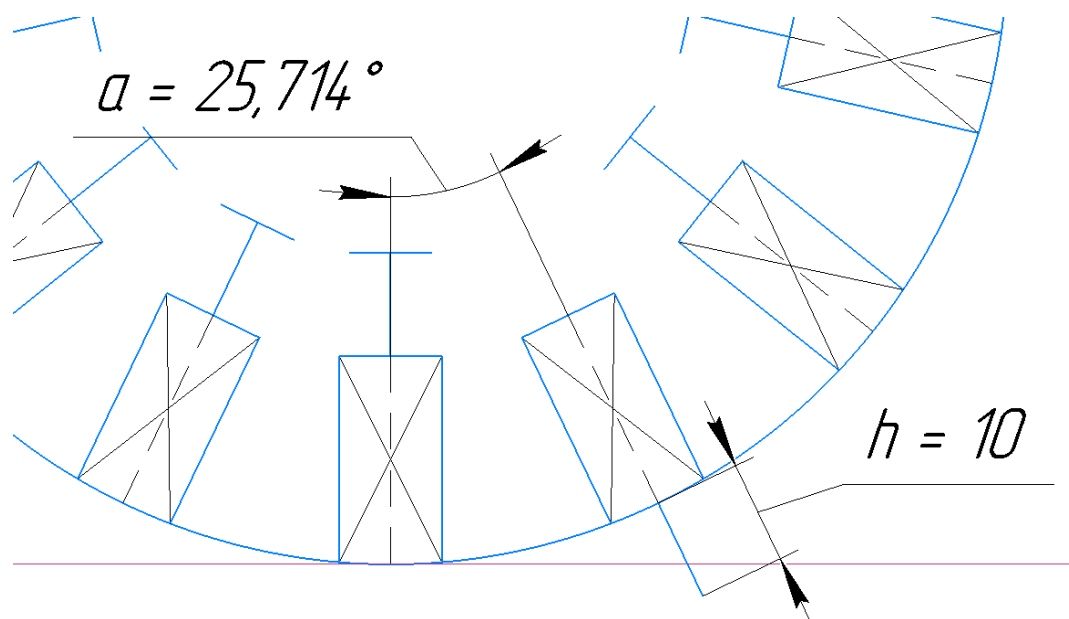


Рис. 4. Выдвинутый шток

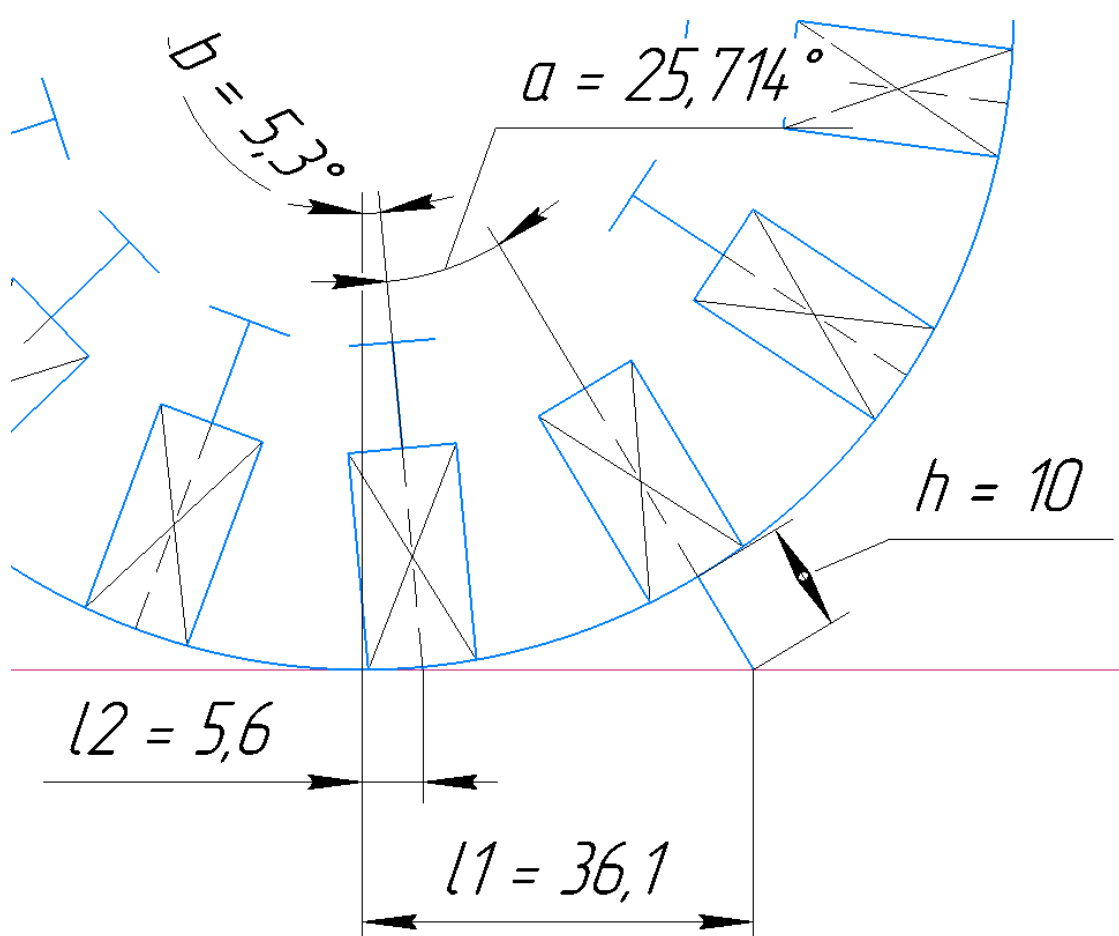


Рис. 5. Поворот робота

Проверка в 3D

Далее следовала проверка собираемости полученной схемы в 3D. Для этого в сборку добавлялась модель выбранного привода и создавался круговой массив. Необходимо было убедиться в отсутствии пересечений, в противном случае следовало вернуться к подбору угла α . Далее добавили две базовые поверхности в форме одинаковых дисков к сборке, на Рисунке 4 показан один из них. Далее получили значение момента инерции относительно оси вращения $J_z = 10\text{Е}6 \text{ г}\cdot\text{мм}^2 = 10\text{Е-}3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ с помощью встроенных инструментов Компас-3D.

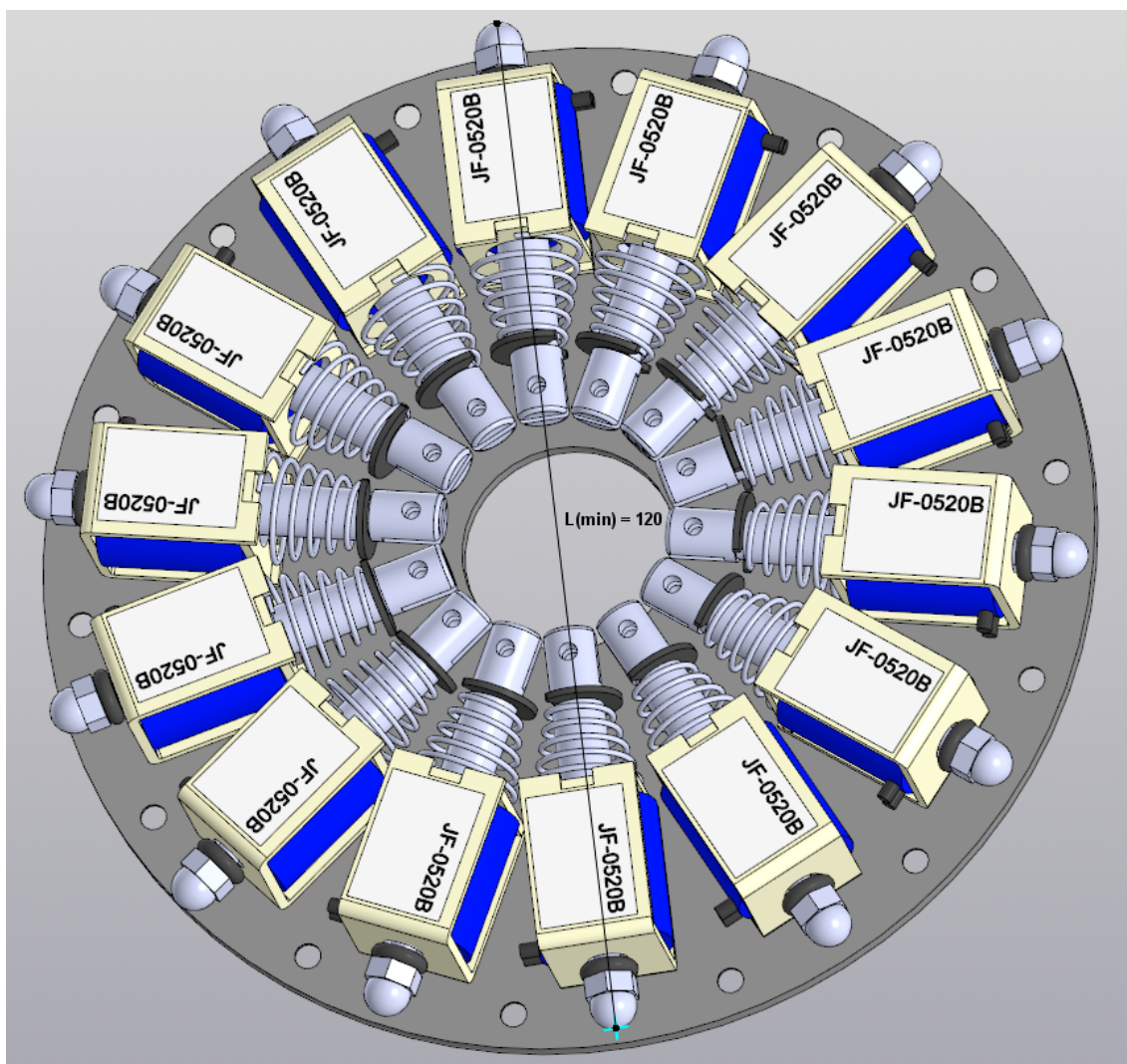


Рис. 6. Сборка актуаторов на базовой поверхности

Оценка динамических параметров

Для дальнейшей работы необходимо было получить зависимость силы актуатора в начале движения от питающего напряжения (Рисунок 5). Исследовался диапазон питающего напряжения от 5 до 28 вольт. Для получения зависимости проведено два цикла измерений и вычислены средние значения. Полученные данные хорошо согласуются с теоретической зависимостью, которая имеет квадратичную форму. Так как планировалась работа приводов в импульсном режиме, то использовалось максимально возможное напряжение 28 В. Силу актуатора для расчётов при таком напряжении принимали равной $F = 0.32 \text{ Н}$. Рассмотрена сила в начале движения, так как она является минимальной.

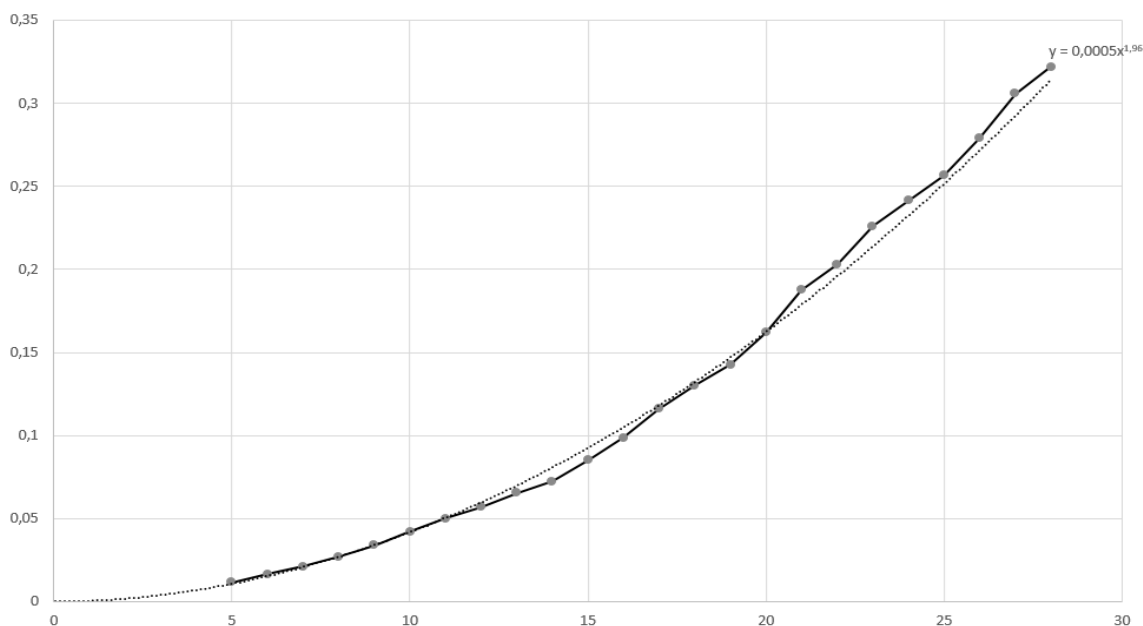


Рис. 5. Зависимость силы привода от питающего напряжения

Далее оценили получаемый крутящий момент и угловое ускорение в начале движения:

$$M = F \times l_2 \times \cos(\alpha) = 0.32 \text{ Н} \times 0.0056 \text{ м} \times \cos(5.3^\circ) = 0.00178 \text{ Нм};$$

$$\beta = M \div J_z = 0.00178 \text{ Нм} \div 0.001 \text{ кг} \times \text{м}^2 = 1.78 \text{ с}^{-2}.$$

Примем время действия одного актуатора $t = 0.5 \text{ с}$, тогда угловая скорость:

$$\omega = \beta \times t = 1.78 \text{ с}^{-2} \times 0.5 \text{ с} = 0.89 \text{ с}^{-1}.$$

Стоит отметить, что в действительности угловое ускорение будет возрастать в течение времени действия. Для расчёта взята постоянная сила актуатора в начале движения, когда на самом деле она возрастает по сложному закону. Решение, приближенное к точному, можно получить с использованием САЕ-программ, выполнив расчёт методом конечных элементов.

Из имеющихся данных был оценен КПД. Потребляемая электрическая мощность актуатора $P = 60 \text{ Вт}$, время действия $t = 0,5 \text{ с}$:

$$\eta = \frac{J_z \times \omega^2}{2 \times P \times t} \times 100\% = \frac{0.001 \times 0.89^2}{2 \times 60 \times 0.5} \approx 0.001\%.$$

Такой низкий КПД получился из-за использования не очень эффективных соленоидных актуаторов. Данная конструктивная схема позволяет использовать любые поступательные приводы, например, искусственные мышцы.

Проверка прототипа

Необходимые детали были изготовлены с использованием FDM 3D-принтера. Соленоидные актуаторы включались через транзисторы IRFZ24, которыми управляло Arduino Nano, обратная связь по углу поворота вокруг оси собиралась с гироскелерометра MPU6050, программа управления написана в среде Arduino IDE. Собранное устройство показано на Рисунке 6. На примере данного прототипа была проверена работоспособность конструктивной схемы и получен положительный результат.

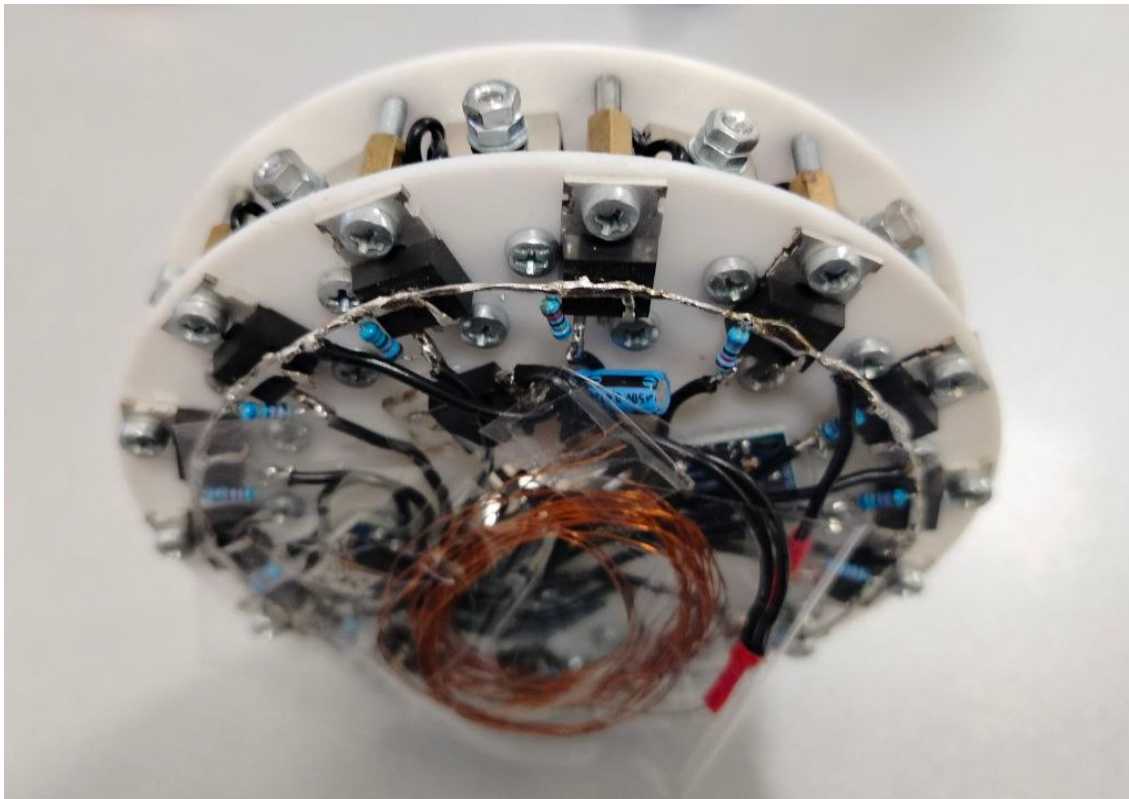


Рис. 6. Лабораторный прототип

Библиографический список

1. Гим К.Г., Ким Дж. Рингбот: моноцикл с ногами // IEEE Транзакции по робототехнике. 2024. Т. 40. С. 1890–1905. DOI: 10.1109/TRO.2024.3362326. EDN: TIWZEX.
2. Чжан Ю., Цзинь Х., Чжао Дж. Управление динамическим балансом двугироскопического моноцикла на основе контроллера слайдинга // Датчики. 2023. Т. 23, №3. С. 1064. DOI: 10.3390/s23031064.
3. Хо М.-Т., Ризал Ю., Чен Ю.-Л. Управление балансом моноцикла // 23-й международный симпозиум по промышленной электронике (ISIE). 2014. С. 1–6. DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864782.
4. Соленоид JF-0520B [Электронный ресурс]. URL: <https://iarduino.ru/shop/Mehanika/solenoid-tau-0520.html> (дата обращения: 10.10.2024).

References

1. Gim K.G., Kim J. Ringbot: Monocycle Robot With Legs. IEEE Transactions on Robotics. 2024. Vol. 40. Pp. 1890-1905. URL: <https://doi.org/10.1109/TRO.2024.3362326>.
2. Zhang Y., Jin H., Zhao J. Dynamic Balance Control of Double Gyros Unicycle Robot Based on Sliding Mode Controller. Sensors. 2023. Vol. 23(3). Pp. 1064. URL: <https://doi.org/10.3390/s23031064>.
3. Ho M.-T., Rizal Y., Chen Y.-L. Balance control of a unicycle robot. IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2014. URL: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864782>.

4. Solenoid JF-0520B, accessed 10 October 2024. URL: <https://iarduino.ru/shop/Mehanika/solenoid-tau-0520.html> (In Russian).

STRUCTURAL DESIGN OF A MONOCYCLE ROBOT

Mironov Velimir V.

Breeze LLC, office 309/2, room. 18-N, p. 1, bldg. 1, 8, Sofiyskaya st.,
St. Petersburg, 192236, Russia, velimir.mironov@gmail.com

This paper presents a design scheme of an autonomous monocyce robot driven by translational drives. In the course of the work, kinematics was developed for a monocyce robot moving on a flat horizontal surface without using kinematic pairs (KP) of rotation and rotary drives. To determine the geometry of the kinematic model, methods for selecting the parameters of the mechanism links using the Kompas-3D CAD-program are proposed. To determine the dynamic model, a method for selecting the necessary power parameters of the drives is proposed; in this case, the force in the translational kinematic pair was selected. To meet the dynamic conditions of the given model, the force in the KP must be at least 0.3 N. To test the model, a prototype of the device with a diameter of 120 mm, a mass of about 0.6 kg, a torque of 1.78×10^{-3} Nm and autonomous movement was designed and implemented as a laboratory sample. Testing of the prototype showed the operability of the proposed design scheme.

Keywords: kinematic diagram, design diagram, monowheel robot, monocyce, linear drives.

НАВИГАЦИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ И КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Мухаметсафин Руслан Тахирович, Сторожев Сергей Александрович

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614000, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, muhametsafin.r@yandex.ru

Статья посвящена актуальной задаче навигации автономных мобильных роботов в неструктурированных средах. Авторы рассматривают и сравнивают два подхода: классический метод конечных автоматов и более гибкий метод, основанный на нечеткой логике. Для наглядности реализованы и протестированы в среде MATLAB SIMULINK, используя Mobile Robotics Simulation Toolbox, Модели робота с дифференциальным приводом, использующие оба подхода. Результаты моделирования, представленные в виде траекторий движения и графиков скоростей, демонстрируют преимущества подхода на основе нечеткой логики. Он обеспечивает более плавное движение и позволяет находить оптимальные пути обхода препятствий, что снижает износ механизмов робота и повышает плавность управления. Анализ полученных данных подтверждает эффективность применения нечеткой логики для решения задач навигации мобильных роботов.

Ключевые слова: навигация, мобильные роботы, нечеткая логика, конечные автоматы, сравнительный анализ, моделирование, MATLAB SIMULINK.

Современный этап развития робототехники характеризуется повышенным интересом к созданию автономных мобильных роботов, способных функционировать в неструктурированных и динамически меняющихся средах. Ключевой проблемой в данном контексте является задача эффективной навигации.

Данная статья посвящена рассмотрению и сравнению двух подходов к решению задачи навигации мобильного робота: метода состояний и метода нечеткой логики. Метод состояний моделирует окружающую среду и положение робота в дискретной форме. Алгоритм принятия решений робота основан на анализе текущего состояния и использовании предопределенных правил перехода между состояниями.

В свою очередь, метод нечеткой логики оперирует лингвистическими переменными и функциями принадлежности, что позволяет учитывать неточности и неопределенности, свойственные реальным условиям функционирования робота. В статье будет проведено детальное сравнение данных подходов с точки зрения их применимости, точности, вычислительной сложности и способности к адаптации к динамическим изменениям окружающей среды.

В качестве объекта управления для исследования алгоритмов навигации выбран мобильный робот с дифференциальным приводом (Differential Drive). Моделирование робота и

его взаимодействия с окружающей средой осуществляется в среде MATLAB SIMULINK с использованием специализированного инструментария Mobile Robotics Simulation Toolbox.

Рассматриваемая модель робота представляет собой платформу с двумя ведущими колесами, расположенными на задней оси симметрично относительно продольной оси. Каждое ведущее колесо оснащено независимым приводом, что обеспечивает возможность управляемого движения робота.

Управление КР будет осуществляться при помощи алгоритма на основе нечеткой логики, включающего в себя три нечетких регулятора (НР), отвечающих за объезд препятствий, движение к цели и групповой нечеткий регулятор [1, 2], согласующий работу предыдущих двух.

Каждый из представленных НР имеет входы и выходы. Каждый из входных параметров проходит через фаззификатор, на выходе которого получаем степень принадлежности к одному из терм-множеств. Графически используемые терм-множества представлены ниже на рис. 1 [3].

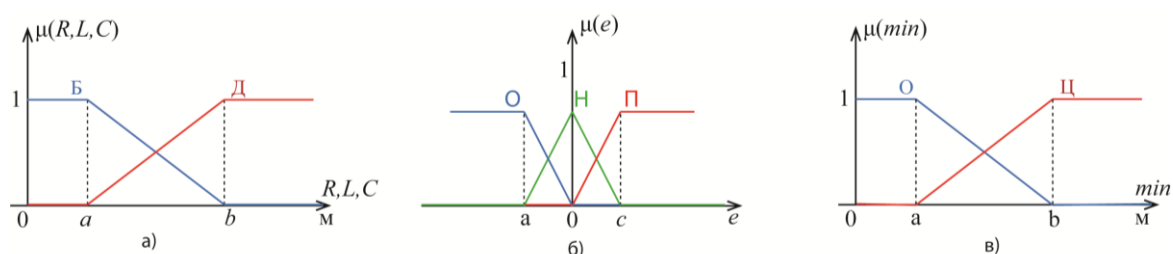


Рис. 1. Термы множеств НР
а) для объезда препятствий б) для движения к цели в) групповой

Входом фаззификатора НР объезда препятствий являются показание датчиков. Выходами фаззификатора являются степени принадлежности к терм-множествам «Б» и «Д». В нечетком регуляторе движения к цели фаззификатор имеет другой вид. Входом фаззификатора является отклонение направления робота от цели – «е». Выходом является степени принадлежности к терм-множествам «О», «Н», «П». Групповой нечеткий регулятор настраивается таким образом, чтобы оба предыдущих регулятора работали совместно. На вход фаззификатора подается минимальное значение, получаемое с датчиков, – «min». Выходами являются степени принадлежности к терм-множествам «О», «Ц».

Для дефаззификация создается блок правил и находится взвешенное среднее для каждого из НР (1) [3]:

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (1)$$

где μ_i – степень принадлежности i -го правила, ω_i – выходное значение, соответствующее i -му правилу, n – количество правил в нечеткой системе.

Для сравнительного анализа алгоритма с автоматной моделью и модели на основе нечеткой логики была разработана программа в среде MATLAB SIMULINK (рис. 2). Для аппроксимации автоматной модели групповой НР заменяется на автомат, который переключает режимы работы в зависимости от минимальной длины с датчиков.

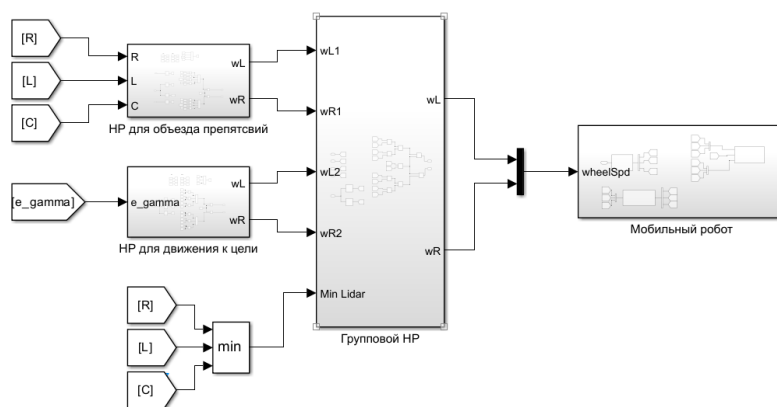


Рис. 2. Программа для моделирования движения мобильного робота

На рисунке 3 представлены траектории движения робота, полученные с помощью двух разных моделей: автоматной (а) и модели с нечёткой логикой (б). Модель с нечёткой логикой, представленная на изображении (б), демонстрирует более плавную и естественную траекторию по сравнению с автоматной моделью, показанной на изображении (а). Эта плавность достигается благодаря учету степени принадлежности к множествам, а не бинарных переходов, что позволяет находить более оптимальные и безопасные пути, обходя препятствия на большем расстоянии. Однако, такая гибкость и точность модели с нечёткой логикой достигается за счёт большей сложности реализации, чем у автоматной модели.

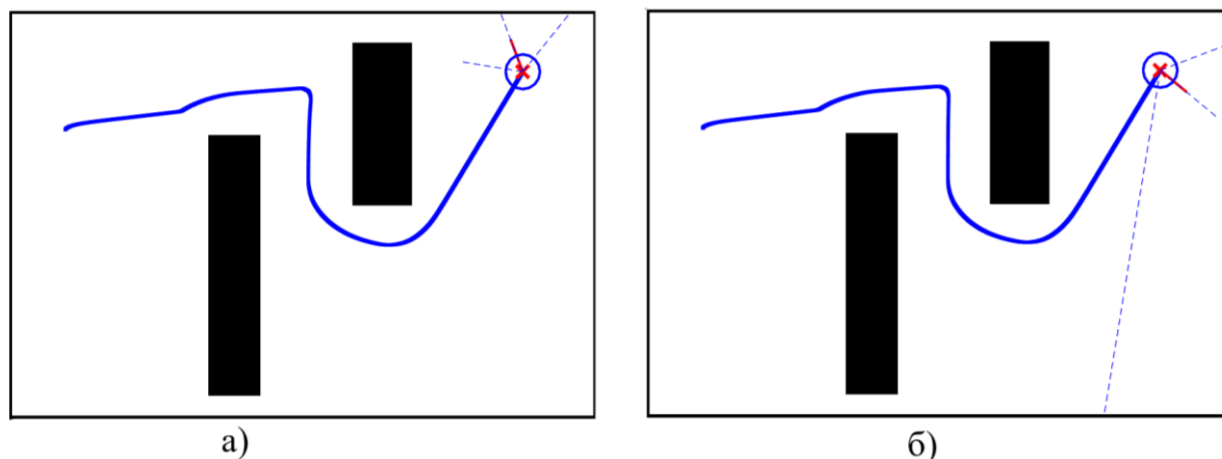


Рис. 3. Траектория движения мобильного робота
а) Автоматная модель б) Модель с нечеткой логикой

Рассмотрим графики угловых скоростей одного из колес робота на рис. 4.

Графики угловой скорости колеса мобильного робота (рис. 4) демонстрируют явное преимущество модели на основе нечёткой логики (красный) по сравнению с автоматной моделью (синий). Нечёткая логика обеспечивает значительно более плавное изменение скорости с меньшим количеством резких переключений, что особенно заметно в диапазоне 8-25 секунд. Такой характер управления предпочтительнее для мобильных роботов, так как позволяет избежать рывков, повысить плавность движения и снизить износ механизмов.

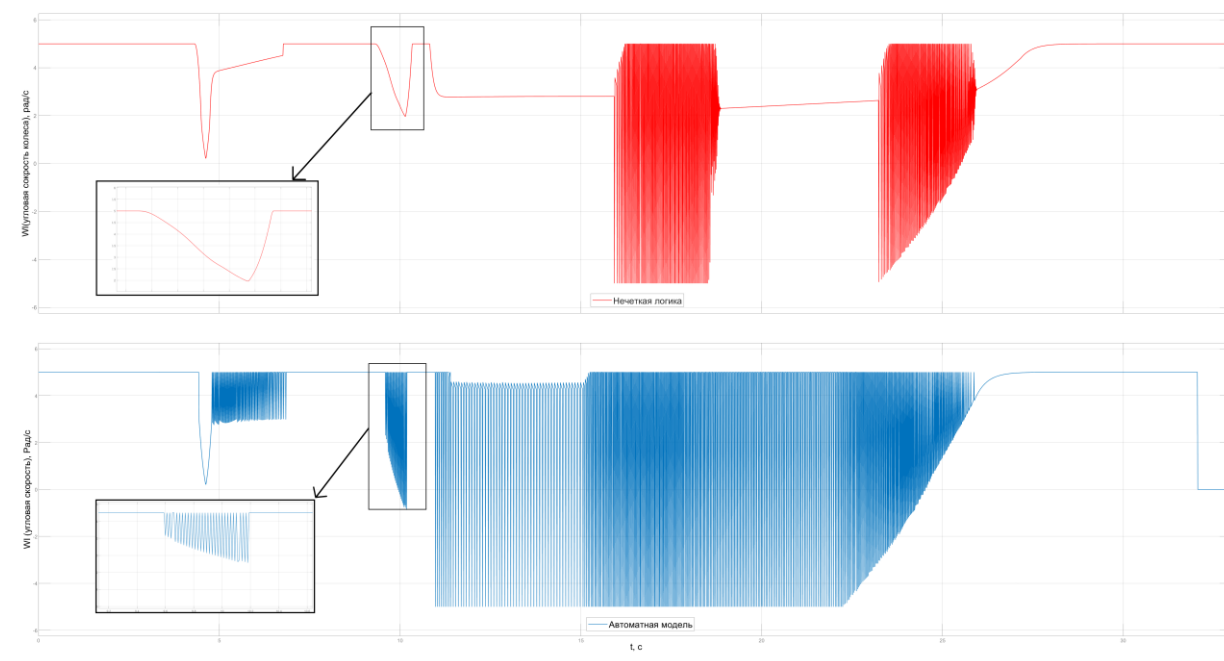


Рис. 4. График угловых скоростей левого колеса:
синий – автоматная модель, красный – модель с нечеткой логикой

Вывод

Проведенное исследование сравнило два подхода к навигации мобильного робота: метод конечных автоматов и метод нечёткой логики. Моделирование в среде MATLAB SIMULINK показало, что нечёткая логика обеспечивает более плавное движение робота, выбор оптимальных путей обхода препятствий и снижает количество резких переключений скорости. Результаты подтверждают эффективность нечеткой логики для навигации мобильных роботов в неструктурированных средах, открывая перспективы для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию вычислительной сложности алгоритмов и их адаптацию к более сложным сценариям.

Библиографический список

1. *Сторожев С.А.* Адаптивная групповая логико-динамическая система автоматического управления газотурбинного двигателя на базе нечеткого подхода: дис. ... канд. техн. наук: 2.3.3. Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, Пермь, 2023. 345 с. EDN: YACXNW.
2. *Петунин В.И.* Математические модели многосвязных систем автоматического управления с селекторами каналов // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, №2 (42). С. 52–58. EDN: OHMITL.
3. *Хижняков Ю.Н.* Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени: учебное пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 156 с.
4. *Стрельцов С.М.* Навигация мобильного робота на базе алгоритмов нечеткой логики // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всероссийской научно-технической конференции: в 2 т. Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2022. С. 372–378.

5. Костыгов А.М., Даденков Д.А., Каверин А.А. Нечёткая система управления движением мобильного робота // Современные проблемы науки и образования. 2013. №5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10639> (дата обращения: 20.10.2024). EDN: RRJRLX.
6. Бобырь М.В. Адаптация системы управления мобильным роботом на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, №7. С. 449–455. DOI: 10.17587/mau.16.449-455. EDN: UBKQUH.

References

1. Storozhev S.A. Adaptivnaia gruppavaia logiko-dinamicheskaiia sistema avtomaticheskogo upravleniia gazoturbinnogo dvigatel'ia na baze nechëtckogo podkhoda [Adaptive Group Logic-Dynamic System of Automatic Control of a Gas Turbine Engine Based on a Fuzzy Approach]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 2.3.3. Perm. nats. issled. politekhn. un-t, Perm, 2023. 345 p. (In Russian).
2. Petunin V.I. Matematicheskie modeli mnogosv'язnykh sistem avtomaticheskogo upravleniia s selektorami kanalov [Mathematical Models of Multivariable Automatic Control Systems with Channel Selectors] // Vestnik UGATU [Vestnik of UGATU]. 2011. Vol. 15, №2 (42). Pp. 52–58 (In Russian).
3. Khiznyakov Yu.N. Algoritmy nechëtckogo, neironnogo i neuro-nechëtckogo upravleniia v sistemakh real'nogo vremeni: ucheb. posobie [Algorithms for Fuzzy, Neural, and Neuro-Fuzzy Control in Real-Time Systems: Textbook]. Perm: Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta, 2013. 156 p. (In Russian).
4. Strel'tsov S.M. Navigatsiia mobil'nogo robota na baze algoritmov nechëtckoi logiki [Navigation of a Mobile Robot Based on Fuzzy Logic Algorithms] // Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii: mater. vseros. nauch.-tekhn. konf.: v 2 t. [Automated Control Systems and Information Technologies: Proc. All-Russian Scientific and Technical Conf.: in 2 vol.]. Perm: Perm. nats. issled. politekhn. un-t, 2022. Pp. 372–378 (In Russian).
5. Kostygov A.M., Dadenkov D.A., Kaverin A.A. Nechiotkaia sistema upravleniia dvizheniem mobil'nogo robota [Fuzzy Control System for Mobile Robot Motion] // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia [Modern Problems of Science and Education]. 2013. №5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10639> (accessed: 20.10.2024) (In Russian).
6. Bobyry' M.V. Adaptatsiia sistemy upravleniia mobil'nym robotom na osnove nechëtckoi logiki [Adaptation of a Mobile Robot Control System Based on Fuzzy Logic] // Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie [Mechatronics, Automation, Control]. 2015. Vol. 16, №7. Pp. 449–455. DOI: 10.17587/mau.16.449-455 (In Russian).

NAVIGATION OF MOBILE ROBOTS BASED ON FUZZY LOGIC AND FINITE-STATE MACHINES: A COMPARATIVE ANALYSIS

Mukhametsafin Ruslan T., Storozhev Sergey A.

Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky av., Perm, 614000, Russia, muhametsafin.r@yandex.ru

The article is devoted to the current problem of navigation of autonomous mobile robots in unstructured environments. The authors consider and compare two approaches: the classical finite-state

machine method and a more flexible method based on fuzzy logic. For clarity, models of a robot with a differential drive using both approaches were implemented and tested in the MATLAB SIMULINK environment using the Mobile Robotics Simulation Toolbox. The simulation results, presented in the form of motion trajectories and velocity graphs, demonstrate the advantages of the fuzzy logic approach. It provides smoother movement and allows finding optimal ways to avoid obstacles, which reduces wear on the robot's mechanisms and increases control smoothness. The analysis of the obtained data confirms the effectiveness of using fuzzy logic to solve mobile robot navigation problems.

Keywords: navigation, mobile robots, fuzzy logic, finite state machines, comparative analysis, modeling, MATLAB SIMULINK.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТСРОЧКИ ПОИМКИ ЦЕЛИ В АДТ-ИГРЕ В ПРОСТЫХ ДВИЖЕНИЯХ

Самохин Александр Сергеевич

Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65, samokhin@ipu.ru

Рассматривается вариант плоской Attacker-Defender-Target задачи с несколькими (до 3) защитниками. Задача рассматривается в простых движениях в плоской постановке: цель и защитники двигаются прямолинейно с постоянной скоростью. Начальное положение цели и атакующего задано. В этом случае движение цели определяется её начальным вектором скорости, а защитников – моментом и углом выпуска. Защитники представляют собой ложные цели, фактически задача заключается в определении таких траекторий защитников, при которых атакующий вначале занимается их перехватом, и только после этого переключается на преследование основной цели. Тем самым время перехвата основной цели увеличивается, и при некоторых значениях параметров она может стать недостижима для имеющего ограниченный запас энергоресурса атакующего. В исследовании рассматриваются различные математические модели работы системы самонаведения автономного атакующего аппарата, использующего пропорциональную навигацию.

Ключевые слова: преследование, система самонаведения, использование защитников, автономный аппарат, оптимизация, численное моделирование, перехват, АДТ, пропорциональная навигация, ложная цель.

Существуют различные способы защиты подвижного объекта в водной среде от мобильного атакующего, оснащённого системой самонаведения: маневр уклонения, использование пассивных ложных целей, отражающих гидроакустический сигнал, буксируемых постановщиков гидроакустических помех, использование активных защитников, которые перехватывали бы атакующего, использование активных ложных целей, имитирующих защищаемый объект [1–4].

В настоящей работе рассматривается случай активной защиты, в то время как основная цель уклоняется от атаки, она может выпустить от 1 до 3 ложных целей (decoy). Ложные цели отвлекают внимание атакующего, вынуждают атакующего тратить энергоресурс на свою поимку, и позволяют тем самым основной цели совершить продолжительный маневр уклонения, не допустив встречи атакующего с основной целью. В таком случае взаимодействие объектов может быть описано как Attacker–Defender–Target игра (атакующий – защитник – цель) [5–10].

© Самохина М.А., Самохин А.С., 2025

Публикация подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №23-19-00134).

В большинстве исследований каждая из сторон «атакующий – защитник – цель» представлена 1 игроком. Отметим работы [11], [12], в которых проанализирована игра в случае двух атакующих. В работе [13] рассмотрен случай сразу нескольких преследователей, в статье [14] исследовалась дифференциальная игра с несколькими нападающими, несколькими защитниками в случае неподвижной цели.

Перемещение цели и защитников в работе рассматривается в простых движениях. В декартовой системе координат движение цели описывается соотношениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_T = v_T \cos(\gamma_T), \\ \dot{y}_T = v_T \sin(\gamma_T), \end{cases}$$

где $(x_T(t), y_T(t)) = \mathbf{r}_T(t)$ – координаты цели в момент времени t , при этом $x_T(0) = y_T(0) = 0$.

Движение защитников описывается аналогичными соотношениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_{Di} = v_D \cos(\gamma_{Di}), \\ \dot{y}_{Di} = v_D \sin(\gamma_{Di}), \end{cases}$$

где $i = 1..3$, $(x_{Di}(t), y_{Di}(t)) = \mathbf{r}_{Di}(t)$ – координаты i -го защитника в момент времени t .

Предполагается, что автономный атакующий аппарат движется с постоянной скоростью, большей скорости цели и оснащён системой самонаведения.

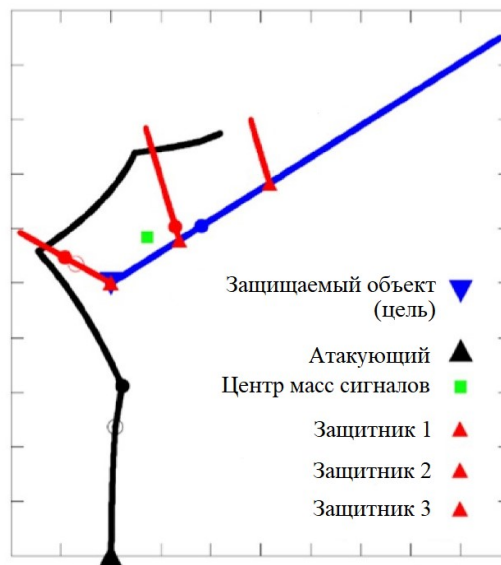


Рис. Схема ADT-игры

Вначале атакующий движется к центру масс всех видимых объектов, осуществляя совместное преследование, далее он преследует объекты отдельно, по очереди, пока не порази́т основную цель или пока у него не закончится энергоресурс (см. рис.). Очередность выбирается, исходя из расстояния или угловой дальности до объектов, и может меняться в ходе преследования. На некотором расстоянии до защитника атакующий распознаёт, что перед ним находится не основная цель, и переключается на преследование следующего объекта.

Предполагается, что атакующий использует пропорциональную навигацию [15–17].

На рисунке изображена схема игры, полыми кругами отмечены положения первого защитника и атакующего в момент выпуска второго защитника, закрашенными кругами – положение всех игроков в момент перехода атакующего от совместного преследования к очередному, 3-й защитник на этот момент ещё не выпущен.

В результате проведенного численного моделирования, в котором оптимизировался выпуск защитников, получены сценарии выпуска защитников, при которых атакующий не сумеет догнать цель до исчерпания своего энергоресурса, что означает целесообразность выпуска ложных целей для защиты от атакующего, оснащённого системой самонаведения.

В качестве развития работы задача может быть рассмотрена в 3-мерной постановке с более сложной динамикой объектов, с ограничением на время выпуска защитников, может быть исследован вопрос оптимизации угла манёвра защищаемого объекта и проанализирован случай нескольких атакующих.

Библиографический список

1. Kim W., Shin M., Park J., Bae S. A Simulator Development of Surface Warship Torpedo Defense System considering Bubble-Generating Wake Decoy // J. KIMS Technol. 2024. Vol. 27, no. 3. Pp. 416–427. DOI: 10.9766/KIMST.2024.27.3.416. EDN: ONCHEA.
2. Jomon G., Sinchu P., Kumar K., Santhanakrishnan T. Towed Acoustic Countermeasures for Defending Acoustic Homing Torpedoes // Defence science journal. 2019. Vol. 69, no. 6. Pp. 607–612. DOI: 10.14429/dsj.69.13337.
3. Zhan K., Yu B., Wang J. Simulations of the Anti-Torpedo Tactic of the Conventional Submarine Using Decoys and Jammers // Applied Mechanics and Materials. 2011. Vol. 65. Pp. 165–168. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.65.165.
4. Jomon G., Jojish J.V., Santhanakrishnan T. System of Systems Architecture for Generic Torpedo Defence System for Surface Ships // Advances in Military Technology. 2019. Vol. 14, no. 2. Pp. 307–319. DOI: 10.3849/aimt.01330.
5. Pachter M., Garcia E., Casbeer D.W. Toward a Solution of the Active Target Defense Differential Game // Dyn Games Appl. 2019. Vol. 9. Pp. 165–216. DOI: 10.1007/s13235-018-0250-1. EDN: YVMEJV.
6. García E., Casbeer D., Pachter M. The Complete Differential Game of Active Target Defense // Journal of Optimization Theory and Applications. 2021. Vol. 191. Pp. 1–25. DOI: 10.1007/s10957-021-01816-z. EDN: PCQWLU.
7. Gong X., Chen W., Chen Z. Intelligent Game Strategies in Target-Missile-Defender Engagement Using Curriculum-Based Deep Reinforcement Learning // Aerospace. 2023. Vol. 10, no. 2. Art. no. 133. 21 p. DOI: 10.3390/aerospace10020133. EDN: WZLPB.
8. Jacob T.E., Ja,y P.W. Defender-Aware Attacking Guidance Policy for the Target-Attacker-Defender Differential Game // Journal of Aerospace Information Systems. 2021. Vol. 18, no. 6. Pp. 366–376. DOI: 10.2514/1.I010877. EDN: UOMOQV.
9. Rubinovich E.Ya. Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a priori Information // Dynamic Games and Applications (Special Issue). 2021. Vol. 9, no. 17. Pp. 851–857. DOI: 10.1007/s13235-019-00297-0.
10. Alkaher D., Moshaiov A. Game-Based Safe Aircraft Navigation in the Presence of Energy-Bleeding Coasting Missile // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2016. Vol. 39. Pp. 1539–1550. DOI: 10.2514/1.G001676.

11. *García E., Casbeer D.W., Pachter M.* Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender // *IET Control Theory and Applications*. 2017. Vol. 17, no. 11. Pp. 2985–2993. DOI: 10.1049/iet-cta.2017.0302.
12. *Liu F., Dong X., Li Q., Ren Z.* Cooperative differential games guidance laws for multiple attackers against an active defense target // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. Vol. 35. Pp. 374–389. DOI: 10.1016/j.cja.2021.07.033. EDN: VOTPXS.
13. *Zhou Z., Zhang W., Ding J., et al.* Cooperative pursuit with Voronoi partitions // *Automatica*. 2016. Vol. 72. Pp. 64–72. DOI: 10.1016/j.automatica.2016.05.007.
14. *Chen M., Zhou Z., Tomlin C.J.* Multiplayer reach-avoid games via pairwise outcomes // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. Vol. 62, no. 3. Pp. 1451–1457. DOI: 10.1109/TAC.2016.2577619.
15. *García E., Casbeer D., Pham Kh., Pachter M.* Cooperative Aircraft Defense from an Attacking Missile using Proportional Navigation // *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Kissimmee, Florida, 2015. Pp. 2926–2931. DOI: 10.2514/6.2015-0337.
16. *Girard A., Kabamba P.* Proportional Navigation: Optimal Homing and Optimal Evasion // *SIAM Review*. 2015. Vol. 57. Pp. 611–624. DOI: 10.1137/130947301.
17. *Palumbo N., Blauwkamp R., Lloyd J.* Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques // *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 2010. Vol. 29, no. 1. P. 42–59.

References

1. *Kim W., Shin M., Park J., Bae S.* A Simulator Development of Surface Warship Torpedo Defense System considering Bubble-Generating Wake Decoy // *J. KIMS Technol.* 2024. Vol. 27, no. 3. Pp. 416–427. DOI: 10.9766/KIMST.2024.27.3.416. EDN: ONCHEA.
2. *Jomon G., Sinchu P., Kumar K., Santhanakrishnan T.* Towed Acoustic Countermeasures for Defending Acoustic Homing Torpedoes // *Defence science journal*. 2019. Vol. 69, no. 6. Pp. 607–612. DOI: 10.14429/dsj.69.13337.
3. *Zhan K., Yu B., Wang J.* Simulations of the Anti-Torpedo Tactic of the Conventional Submarine Using Decoys and Jammers // *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 65. Pp. 165–168. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.65.165.
4. *Jomon G., Jojish J.V., Santhanakrishnan T.* System of Systems Architecture for Generic Torpedo Defence System for Surface Ships // *Advances in Military Technology*. 2019. Vol. 14, no. 2. Pp. 307–319. DOI: 10.3849/aimt.01330.
5. *Pachter M., Garcia E., Casbeer D.W.* Toward a Solution of the Active Target Defense Differential Game // *Dyn Games Appl.* 2019. Vol. 9. Pp. 165–216. DOI: 10.1007/s13235-018-0250-1. EDN: YVMEJV.
6. *García E., Casbeer D., Pachter M.* The Complete Differential Game of Active Target Defense // *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2021. Vol. 191. Pp. 1–25. DOI: 10.1007/s10957-021-01816-z. EDN: PCQWLU.
7. *Gong X., Chen W., Chen Z.* Intelligent Game Strategies in Target-Missile-Defender Engagement Using Curriculum-Based Deep Reinforcement Learning // *Aerospace*. 2023. Vol. 10, no. 2. Art. no. 133. 21 p. DOI: 10.3390/aerospace10020133. EDN: WZLPB.
8. *Jacob T.E., Ja,y P.W.* Defender-Aware Attacking Guidance Policy for the Target-Attacker-Defender Differential Game // *Journal of Aerospace Information Systems*. 2021. Vol. 18, no. 6. Pp. 366–376. DOI: 10.2514/1.I010877. EDN: UOMOQV.

9. *Rubinovich E.Ya.* Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a priori Information // *Dynamic Games and Applications (Special Issue)*. 2021. Vol. 9, no. 17. Pp. 851–857. DOI: 10.1007/s13235-019-00297-0.
10. *Alkahrer D., Moshaiov A.* Game-Based Safe Aircraft Navigation in the Presence of Energy-Bleeding Coasting Missile // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2016. Vol. 39. Pp. 1539–1550. DOI: 10.2514/1.G001676.
11. *García E., Casbeer D.W., Pachter M.* Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender // *IET Control Theory and Applications*. 2017. Vol. 17, no. 11. Pp. 2985–2993. DOI: 10.1049/iet-cta.2017.0302.
12. *Liu F., Dong X., Li Q., Ren Z.* Cooperative differential games guidance laws for multiple attackers against an active defense target // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. Vol. 35. Pp. 374–389. DOI: 10.1016/j.cja.2021.07.033. EDN: VOTPXS.
13. *Zhou Z., Zhang W., Ding J., et al.* Cooperative pursuit with Voronoi partitions // *Automatica*. 2016. Vol. 72. Pp. 64–72. DOI: 10.1016/j.automatica.2016.05.007.
14. *Chen M., Zhou Z., Tomlin C.J.* Multiplayer reach-avoid games via pairwise outcomes // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. Vol. 62, no. 3. Pp. 1451–1457. DOI: 10.1109/TAC.2016.2577619.
15. *García E., Casbeer D., Pham Kh., Pachter M.* Cooperative Aircraft Defense from an Attacking Missile using Proportional Navigation // *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Kissimmee, Florida, 2015. Pp. 2926–2931. DOI: 10.2514/6.2015-0337.
16. *Girard A., Kabamba P.* Proportional Navigation: Optimal Homing and Optimal Evasion // *SIAM Review*. 2015. Vol. 57. Pp. 611–624. DOI: 10.1137/130947301.
17. *Palumbo N., Blauwkamp R., Lloyd J.* Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques // *Johns Hopkins APL Technical Digest*. 2010. Vol. 29, no. 1. Pp. 42–59.

MODELING OF THE TARGET INTERCEPTION DELAY IN AN ADT-GAME

Samokhin Alexander S.

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
65, Profsoyuznaya st., Moscow, 117997, Russia, samokhin@ipu.ru

The paper considers a variant of the flat Attacker-Defender-Target problem with several (up to 3) defenders. The problem is considered in simple motions in a flat setting: the target and the defenders move rectilinearly with constant velocity. The initial position of the target and the attacker is given. In this case, the motion of the target is determined by its initial velocity vector, and that of the defenders by the momentum and angle of release. The defenders are false targets (decoys). In fact, the task is to determine such trajectories of the defenders that the attacker first intercepts them and only then switches to pursuit of the main target. In this way, the time to intercept the primary target increases, and at some parameter values it may become unattainable for an attacker with limited energy resources. Various mathematical models of the homing system of an autonomous attack vehicle using proportional navigation are analyzed in numerical simulations.

Keywords: pursuit, homing system, use of defenders, autonomous vehicle, optimization, numerical simulation, interception, ADT, proportional navigation, decoy.

РЕШЕНИЕ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ РАССТАНОВКИ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ ГРАДИЕНТНЫМ МЕТОДОМ

Самохина Марина Александровна, Самохин Александр Сергеевич

Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65, ph@ipu.ru

Исследование посвящено математическим аспектам создания современной системы охраны периметра. Разработан метод, которым численно может быть решена задача оптимизации расстановки обнаружителей с целью противодействия прорыву защищаемого периметра. Защищаемый периметр представляет собой отрезок на плоскости, который пытается за заданное время пересечь уклоняющийся от обнаружения подвижный объект. Данный объект рассматривается как материальная точка, управляемая с целью минимизации функционала риска обнаружения. Решается задача максимина, обнаружители следует расставить таким образом, чтобы минимально возможное значение функционала подвижного объекта было как можно большим. В работе осуществляется численное моделирование, и приводятся результаты, полученные с использованием градиентного метода и решения краевой задачи принципа максимума Л.С. Понтрягина для отыскания траекторий во вспомогательной проблеме поиска пути подвижным объектом.

Ключевые слова: расстановка обнаружителей, конфликтная среда, противодействие уклонению, планирование пути, оптимизация, градиентный метод, численное моделирование, защита периметра, предотвращение прорыва, максимин.

В настоящее время всё более широкое применение находят автономные управляемые аппараты. Такие устройства используются в научном, коммерческом, политическом секторах [1–3]. В том числе они могут использоваться для несанкционированного доступа к охраняемому объекту. Работа посвящена созданию современной охранной системы противодействия такому доступу.

В настоящее время для несанкционированного доступа к охраняемому объекту могут использоваться автономные управляемые аппараты [1, 2]. Работа посвящена созданию современной охранной системы противодействия такому доступу. Система охраны строится из неподвижных обнаружителей, которые, действуя в коалиции, должны осуществлять противодействие скрытному перемещению автономного аппарата [3–8].

В работе предполагается, что поля обнаружителей бесконечные и распространяются равномерно во все стороны, а их расположение, формирующее карту угроз [9], уклоняющемуся подвижному объекту известно. Совместно подвижный объект, представляющий собой в

модели материальную точку, и обнаружители формируют конфликтную среду [10]. Обнаружители в исследовании также представляют собой материальные точки. При заданной конфигурации обнаружителей уклоняющийся подвижный объект перемещается таким образом, чтобы минимизировать риск быть обнаруженной [11].

Задача рассматривается в плоской постановке и заключается в определении положения неподвижных обнаружителей с целью максимизации минимально возможного значения функционала, оптимизируемого уклоняющимся объектом. Подвижный объект перемещается от точки старта до конечного отрезка за фиксированное время T и управляется так, чтобы минимизировать функционал:

$$I = \int_0^T \left(\sum_{i=1}^N q_i \frac{v^2}{r_i^2} \right) dt,$$

зависящий от величины вектора скорости подвижного объекта v , расстояний r_i от него до каждого из обнаружителей S_i , весовых коэффициентов q_i влияния обнаружителей S_i и заданного количества обнаружителей N .

Нужно расположить точки S_i так, чтобы максимизировать J – глобальный минимум функционала подвижного объекта I по всем возможным наборам фиксированных расположений точек L_i .

Для примера были выбраны параметры $q_i=1$, $T=2.6$, $v_{\max}=1$, $Y=0.6$ и отрезок финиша $x \in [-3, 3]$, $y=1$ (см. рис. 1). Для каждого фиксированного на шаге градиентного метода набора обнаружителей пути подвижного объекта строились на основе принципа максимума [12]. Обнаружители разрешалось размещать в области $y \geq Y$.

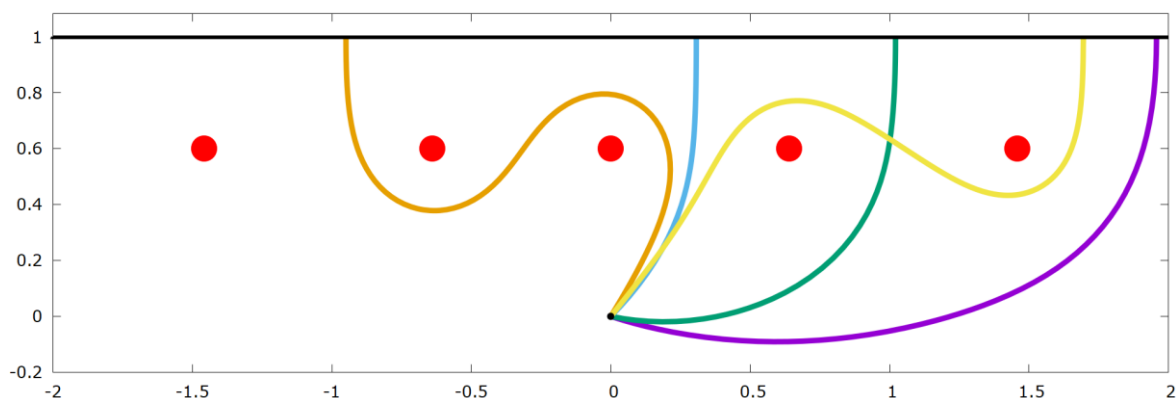


Рис. 1. Карта локально оптимальных путей уклоняющегося объекта для $q_i=1$, $T=2.6$, $v_{\max}=1$

Градиентный метод, запущенный из разных стартовых конфигураций точек по 10 параметрам – их координатам каждый раз уменьшал y_i до величин меньше ограничения $Y = 0.6$ и точки (x_i, y_i) проектировались на прямую $y = Y$. При одинаковых весовых коэффициентах влияния $q_i=1$ точки (x_i, y_i) располагались на прямой $y = Y$ симметрично перпендикуляр, опущенному из точки старта на конечный отрезок: $x_1 = -\alpha_1$, $x_2 = -\alpha_2$, $x_3 = 0$, $x_4 = \alpha_2$, $x_5 = \alpha_1$. Таким образом, в случае одинаковых q_i для различных T , v_{\max} , Y изначальная 10-параметрическая задача в итоге сводилась к 2-параметрической (см. рис. 2).

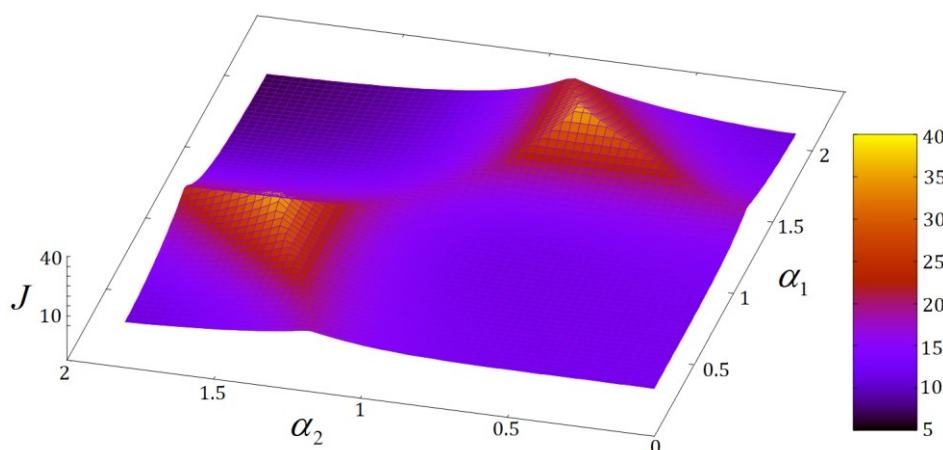


Рис. 2. Зависимость функционала J от параметров α_1, α_2 при $q_i=1, T=2.6, v_{max}=1$

Основной результат – поставленную задачу удалось решить, разработан метод расстановки обнаружителей, проведено моделирование для широкого диапазона параметров.

Библиографический список

1. Wynn R.B., Huvenne V.A.I., Le Bas T.P., Murton B.J., et al. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience // Marine Geology. 2014. Vol. 352. Pp. 451–468. DOI: 10.1016/j.margeo.2014.03.012.
2. Mondal K., Banerjee T., Panja A. Autonomous Underwater Vehicles: Recent Developments and Future Prospects // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2019. Vol. 7 (XI). Pp. 215–222. 10.22214/ijraset.2019.11036. DOI: 10.22214/ijraset.2019.11036.
3. Railey K., Dibiaso D., Schmidt H. Passive acoustic detection and tracking of an unmanned underwater vehicle from motornoise // J. Acoust. Soc. Am. 2021. Vol. 149. A34-A35. DOI: 10.1121/10.0004444.
4. Abbasov I.B. Hydroacoustic Ocean Exploration: Theories and Experimental Application. Beverly, MA, USA: Wiley & Sons and Scrivener Publishing. 2016. 192 p. DOI: 10.1002/9781119323723. ISBN: 978-1-119-32354-9. EDN: XCBUAD.
5. Abraham D.A. Underwater Acoustic Signal Processing: Modeling, Detection, and Estimation. Springer Nature: Cham, Switzerland. 2019. 834 p. DOI: 10.1007/978-3-319-92983-5.
6. Ivanov P.V., Kolev N.Zh. Acoustical system for synthetic imaging of an underwater object in a hydroacoustical test tank. National conference “Acoustics 2014”. Vol. 16. Pp. 146–150.
7. Buszman K., Gloza M. Detection of Floating Objects Based on Hydroacoustic and Hydrodynamic Pressure Measurements in the Coastal Zone // Polish Maritime Research, Sciendo. 2020. Vol. 27 (2). Pp. 168–175. DOI: 10.2478/pomr-2020-0038. EDN: XEDKIE.
8. Shirokov V., Bazhenova A., Milich V. A set of instruments for tracking moving objects in the underwater environment // AIP Conference Proceedings. 2023. 2605 (1), 020026. 8 p. DOI: 10.1063/5.0111555 EDN: PAYCHY.
9. Dogan A., Zengin U. Unmanned Aerial Vehicle Dynamic-Target Pursuit by Using Probabilistic Threat Exposure Map // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2006. Vol. 29. №4. Pp. 723–732. DOI: 10.2514/1.18386/.

10. *Абрамянц Т.Г., Галяев А.А., Маслов Е.П., Рудько И.М., Яхно В.П.* Уклонение подвижного объекта в конфликтной среде от обнаружения системой разнородных наблюдателей // Управление подвижными объектами и навигация. 2015. №2. С. 31–37. EDN: TPWZQH.
11. *Сысоев Л.П.* Критерий вероятности обнаружения на траектории в задаче управления движением объекта в конфликтной среде // Проблемы управления. 2010. №6. С. 65–72. EDN: MWLGRL.
12. *Самохина М.А., Галяев А.А.* Построение карты локально оптимальных путей управляемого подвижного объекта в конфликтной среде при переходе из точки в точку // Проблемы управления. 2024. №1. С. 90–102. DOI: 10.25728/PU.2024.1.8.4 EDN: KAJQCZ.

References

1. *Wynn R.B., Huvenne V.A.I., Le Bas T.P., Murton B.J., et al.* Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Marine Geology*. 2014;352:451–468. URL: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.012>.
2. *Mondal K., Banerjee T., Panja A.* Autonomous Underwater Vehicles: Recent Developments and Future Prospects. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2019;7(XI):215–222. URL: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.11036>.
3. *Railey K., Dibiaso D., Schmidt H.* Passive acoustic detection and tracking of an unmanned underwater vehicle from motornoise. *J. Acoust. Soc. Am.* 2021;149:A34–A35. URL: <https://doi.org/10.1121/10.0004444>.
4. *Abbasov I.B.* Hydroacoustic Ocean Exploration: Theories and Experimental Application. Beverly, MA, USA: Wiley & Sons and Scrivener Publishing. 2016. 192 p. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119323723>.
5. *Abraham D.A.* Underwater Acoustic Signal Processing: Modeling, Detection, and Estimation. Springer Nature: Cham, Switzerland. 2019. 834 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92983-5>.
6. *Ivanov P.V., Kolev N.Zh.* Acoustical system for synthetic imaging of an underwater object in a hydroacoustical test tank. National conference “Acoustics 2014”. 2014;16:146–150.
7. *Buszman K., Gloza M.* Detection of Floating Objects Based on Hydroacoustic and Hydrodynamic Pressure Measurements in the Coastal Zone. *Polish Maritime Research, Sciendo*. 2020;27(2):168–175. URL: <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0038>.
8. *Shirokov V., Bazhenova A., Milich V.* A set of instruments for tracking moving objects in the underwater environment. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2605(1), 020026. 8 p. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0111555>.
9. *Dogan A., Zengin U.* Unmanned Aerial Vehicle Dynamic-Target Pursuit by Using Probabilistic Threat Exposure Map. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2006;29(4):723–732.
10. *Abramyants T.G., Galyaev A.A., Maslov E.P., Rudko I.M., Yakhno V.P.* Evasion of a moving object in a conflict environment from detection by the system of heterogeneous observers. *Management and navigation of moving objects*. 2015;2:31–37.
11. *Sysoev L.P.* A criterion for the probability of detection on a trajectory in the problem of controlling the movement of an object in a conflict environment. *Control Sciences*. 2010;6: 65–72.
12. *Samokhina M.A., Galyaev A.A.* Constructing a Map of Locally Optimal Paths for a Controlled Moving Object in a Threat Environment. *Control Sciences*. 2024;1:90–102. URL: <http://dx.doi.org/10.25728/CS.2024.1.8>.

SOLUTION OF THE FLAT SENSORS PLACEMENT PROBLEM USING THE GRADIENT METHOD

Samokhina Marina A., Samokhin Alexander S.

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
65, Profsoyuznaya st., Moscow, 117997, Russia, ph@ipu.ru

The research is devoted to the mathematical aspects of creating a modern perimeter security system. A method of numerical solution of the problem of optimizing the placement of detectors to counteract the breach of the protected perimeter is developed. The protected perimeter is a segment on the plane, which a mobile object evading detection tries to cross for a given time. This object is considered as a material point controlled to minimize the detection risk functional. The maximin problem is solved: the detectors should be arranged in such a way that the minimum possible value of the moving object functional is as large as possible. The paper presents the results of numerical modeling obtained using the gradient method and the solution of the boundary value problem of the maximum principle of L.S. Pontryagin to solve the auxiliary problem of pathfinding by a mobile object.

Keywords: sensors placement, threat environment, evasion countering, path planning, optimization, gradient method, numerical simulations, perimeter defense, breach prevention, maximin.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПЕРВИЧНЫХ ОШИБОК В МЕХАНИЗМАХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Хабибуллина Лейсан Фаритовна, Хабибуллин Фаниль Фаргатович,

Кузнецов Сергей Петрович

Казанский национальный исследовательский технический университет

имени А.Н. Туполева – КАИ

Россия, 420015, г. Казань, ул. Большая Красная, 55, leisan_vafinal9@mail.ru

В данной статье рассмотрены наиболее часто применяемые при конструировании механизмов элементы кинематических пар. Представлены возможные первичные ошибки для точки, линии и плоскости. Проведен расчет числа первичных ошибок шатуна с элементами двух вращательных пар и предложен метод исключения шести первичных ошибок из всего найденного количества, равного 22. Проведены расчеты относительно пространственного кривошипа и выявлено 30 первичных ошибок, которые в результате сведены до 22. После уменьшения количества первичных ошибок были спроектированы и изготовлены лабораторные модели пространственных 4R механизмов. Разработанные пространственные 4R механизмы активно применяются в мехатронных установках и робототехнических системах. Одним из примеров является промышленный дезинтегратор с приводами на базе пространственных 4R механизмов.

Ключевые слова: первичная ошибка, ошибка в расчетах, механизм, кинематическая пара, структурная схема.

Разрабатываемые робототехнические системы состоят из механизмов, которые в свою очередь состоят из звеньев. Звено механизма включает в себя по крайней мере один элемент кинематической пары, положение которого в произвольно выбранной системе координат определяется некоторым числом параметров. Каждый параметр элемента кинематической пары реального звена имеет неточность, поэтому число первичных ошибок звена будет равно числу параметров.

Важное значение имеют производственные ошибки, которые возникают при изготовлении и сборке деталей механизма. К таким ошибкам относятся:

- отклонения размеров звеньев и расположений элементов кинематических пар от идеальных;
- отклонения формы звеньев- ошибки профилей, непрямолинейность и т.п.;
- зазоры в кинематических парах; перекосы элементов вращательных и поступательных пар, эксцентриситеты и т.п.

Исследования в данной области актуальны. Далее рассмотрим некоторые труды отечественных деятелей.

В работе [1] рассматриваются вопросы об определении ошибок перемещения приближенного прямолинейно-огibaющего механизма, возникающие от наличия зазоров в кинематических парах.

Число первичных ошибок элементов различных кинематических пар и не всего звена может быть уменьшено, если их отсчитывать не от осей произвольно выбранной системы координат, а от связанных с элементами кинематических пар базовых линий или поверхностей. Покажем это на примере шатуна с элементами двух вращательных пар. Если данное звено отнести к произвольной системе координат (рис. 1), то число возможных первичных ошибок будет равно 22, а именно по 11 ошибок в каждом элементе обеих пар [2].

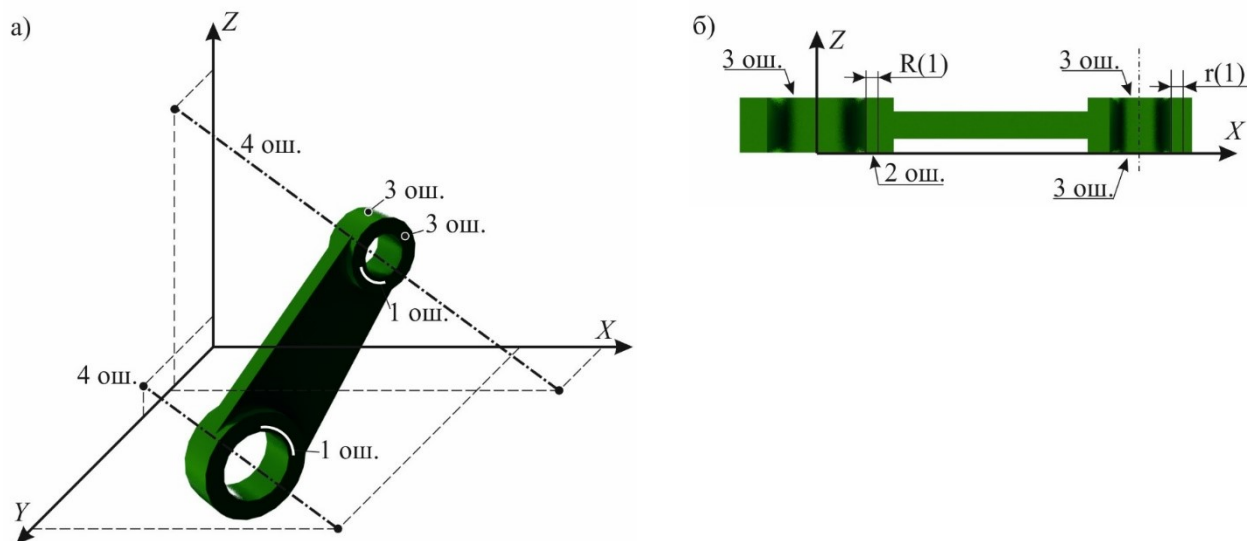


Рис. 1. Модель плоского кривошипа

Если же одну из торцевых поверхностей принять за базовую, а систему координат направить так, чтобы ее ось z совпала с осью одного элемента, а ось второго элемента пересекалась в точке 0, с осью x (рис. 1б), то шесть из 22 первичных ошибок исчезнут (четыре ошибки оси элемента первого шарнира, одна ошибка базовой поверхности и одна ошибка оси второго шарнира) [3].

В результате такого изменения системы отсчета первичных ошибок элемент левого шарнира будет иметь только шесть первичных ошибок, а правый десять. Общее число первичных ошибок в рассматриваемом звене стало равным 16. Число первичных ошибок механизма равно сумме первичных ошибок всех звеньев [4].

Не все первичные ошибки механизма в одинаковой степени влияют на возникновение ошибки положения. Например, (рис. 2а), две первичные ошибки кулачка: ошибка Δr радиуса-вектора и ошибка Δb до его осевого размера [5].

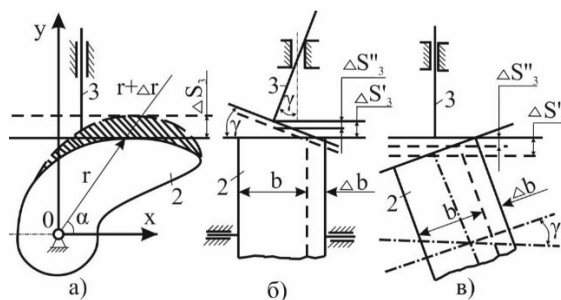


Рис. 2. Структурная схема кулачкового механизма

Первая ошибка вызывает смещение толкателя относительно его идеального положения (пунктир), равнос

$$\Delta S_3 = \Delta r \cdot \sin \alpha ,$$

а вторая так же, как и осевой размер Δb , будет вызывать ошибку положения лишь при перекосах оси кулачка во вращательной и поступательной парах. От поворота кулачка или толкателя в плоскости yz на угол перекоса γ (рис. 3б и 3в) возникает ошибка

$$\Delta S'_3 = (b / 2) \operatorname{tg} \gamma$$

и значительно меньшая ошибка (второй порядок малости)

$$\Delta S''_3 = (\Delta b / 2) \operatorname{tg} \gamma .$$

Первичные ошибки механизма, вызывающие отклонения положения его ведомого звена относительно идеального, называются действующими. Степень влияния их величины на величину ошибки положения оценивается соответствующим коэффициентом [6]. В данном примере эти коэффициенты равны:

$$A_1 = \frac{\Delta S_3}{\Delta r} = \sin \alpha, \quad A_2 = \frac{\Delta S'_3}{\Delta b} = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{2} . \quad (1)$$

Угол перекоса γ по сравнению с углом α поворота кулачка незначителен, поэтому и влияние ошибки Δb на ошибку положения ΔS по сравнению с влиянием ошибки Δr будет иметь более высокий порядок малости [7]. Первичные ошибки, не оказывающие на возникновение ошибки положения механизма никакого влияния ($A = 0$) или влияние которых, по сравнению с остальными, составляет величину более высокого порядка малости, называются недействующими. Деление первичных ошибок на действующие и недействующие дает возможность дифференцировать подход к выбору точности обработки элементов кинематических пар [8].

Выше привели исследование плоских элементов механизмов. Однако большим количеством в станкостроении, инструментостроении и робототехнике используются пространственные механизмы, соответственно пространственные детали и звенья [9]. На рисунке 3 представлена модель пространственного кривошипа (рис. 4). Для данного кривошипа число возможных первичных ошибок будет равно 30 [10].

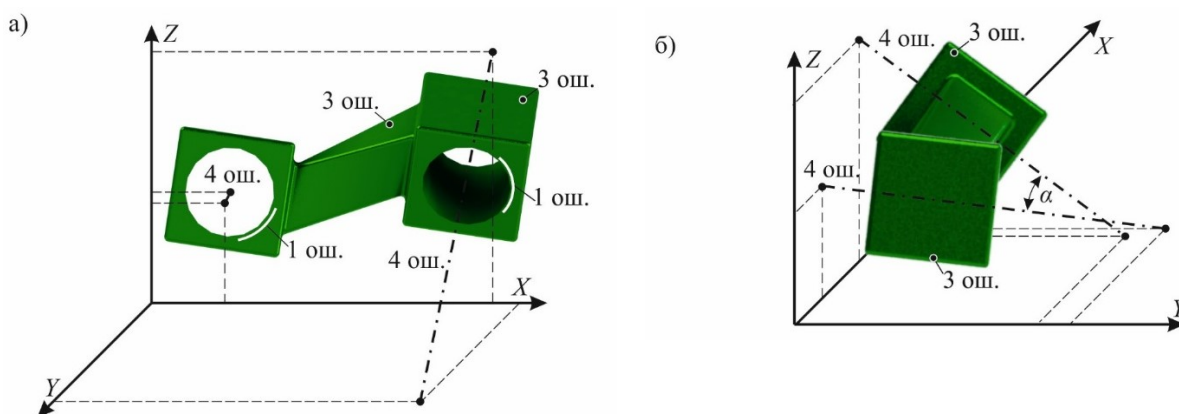


Рис. 3. Модель пространственного кривошипа

Используя выше приведенные способы, мы сможем уменьшить количество ошибок до 22. С применением данного метода нами были спроектированы и изготовлены лабораторные модели пространственных 4R механизмов (рис. 4).



Рис. 4. Лабораторные модели пространственных 4R механизмов

Разработанные пространственные 4R механизмы активно применяем в мехатронных установках и робототехнических системах. Одним из примеров является промышленный дезинтегратор с приводами на базе пространственных 4R механизмов [10].

В результате исследований проведен анализ первичных ошибок в механизмах робототехнических систем. Подводя итоги отметим, что

- ошибки, возникающие при изготовлении и сборке механизмов, являются первичными;
- число первичных ошибок может быть уменьшено, если при проектировании и изготовлении деталей робототехнических систем сделать так, чтобы важные точки детали находились на координатной оси, что доказано на примере шатуна с элементами двух вращательных пар (рис. 1);
- при проектировании механизмов необходимо дифференцировать первичные ошибки на действующие и недействующие с целью оптимизации расходов на точность изготовления не рабочих поверхностей.

Библиографический список

1. *Владимиров А.В., Кузнецов С.А.* Определение ошибок перемещения прямолинейно-огигающего механизма с зазорами // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2007. №2. EDN: KZQNPZ.
2. *Евграфов А.Н., Петров Г.Н.* К вопросу о динамике машин с программным управлением // Современное машиностроение. Наука и образование. 2023. №12. С. 65–80. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-523. EDN: BLNDJH.
3. *Воробьева Н.С., Жога В.В., Жога Л.В.* Динамический синтез алгоритмов управления манипулятором параллельно-последовательной структуры // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, №12. С. 706–715. DOI: 10.17587/mau.21.706-715. EDN: ZICHRG.

4. *Viktorov I., Gibadullin R.* The principles of building a machine-learning-based service for converting sequential code into parallel code // In E3S Web of Conferences. Vol. 431, 05012. EDP Sciences.
5. *Nuriev M., Zaripova R., Sitnikov S., Nurgaliev R.* The principles of building a parallel program for steganographic file protection // In E3S Web of Conferences (Vol. 458, 09027). EDP Sciences.
6. *Хабибуллин Ф.Ф., Исламов Р.Т., Мустафаев Т.А., Крымова В.Н.* Исследование кинематики привода мехатронного устройства на базе пространственного механизма // Омский научный вестник. 2022. №3 (183). С. 48–52. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-48-52. EDN: SUVLVP.
7. *Фаизов М.Р., Мудров А.П.* Исследование движения сферического тренажера // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, №1 С. 182–191. EDN: YZYOEP.
8. *Хабибуллин Ф.Ф., Исламов Р.Т., Хабибуллина Л.Ф.* Анализ параметров ошибки положения, перемещения идеального и реального механизма для робототехнических систем // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2024. №1. С. 36–43. DOI: 10.52261/02346206_2024_1_36. EDN: NHIWTI.
9. *Хабибуллина Л.Ф.* Обучение нейронной сети хопфилда для распознавания рукописных цифр через программирование // Профессиональные коммуникации в научной среде – фактор обеспечения качества исследований: сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 495–499. EDN: IUGCCO.
10. *Хабибуллин Ф.Ф., Мудров А.П.* Исследование методов синтеза приводов дезинтегратора на базе механизма Беннетта // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2018. №3 (62). С. 55–61. EDN: USDLHJ.

References

1. *Vladimirov A.V., Kuznetsov S.A.* Determination of errors in the movement of a rectilinear-envelope mechanism with gaps. News of universities. North Caucasian region. Technical sciences. 2007. No. 2 (In Russian).
2. *Evgrafov A.N., Petrov G.N.* On the dynamics of machines with software control. Modern mechanical engineering. Science and education. 2023. No. 12. Pp. 65–80 (In Russian).
3. *Vorobyova N.S., Zhoga V.V., Zhoga L.V.* Dynamic synthesis of control algorithms for a manipulator with a parallel-sequential structure. Mechatronics, automation, control. 2020. Vol. 21. No. 12. Pp. 706–715 (In Russian).
4. *Viktorov I., Gibadullin R.* The principles of building a machine-learning-based service for converting sequential code into parallel code. In E3S Web of Conferences (Vol. 431, 05012). EDP Sciences.
5. *Nuriev M., Zaripova R., Sitnikov S., Nurgaliev R.* The principles of building a parallel program for steganographic file protection. In E3S Web of Conferences (Vol. 458, 09027). EDP Sciences.
6. *Khabibullin F.F., Islamov R.T., Mustafaev T.A., Krymova V.N.* Study of the kinematics of the drive of a mechatronic device based on a spatial mechanism. Omsk Scientific Bulletin. 2022. No. 3 (183). Pp. 48–52 (In Russian).
7. *Faizov M.R., Mudrov A.P.* Study of the motion of a spherical simulator. Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2019. Vol. 26, No. 1. Pp. 182–191 (In Russian).

8. *Khabibullin F.F., Islamov R.T., Khabibullina L.F.* Analysis of the parameters of the position error, displacement of an ideal and real mechanism for robotic systems. Problems of Mechanical Engineering and Automation. 2024. No. 1. Pp. 36–43 (In Russian).
9. *Khabibullin F.F., Mudrov A.P.* Study of the methods for synthesizing disintegrator drives based on the Bennett mechanism // Progressive technologies and systems of mechanical engineering. 2018. No. 3 (62). Pp. 55–61 (In Russian).
10. *Khabibullina L.F.* Training a Hopfield Neural Network for Handwritten Digit Recognition via Programming // Professional Communications in the Scientific Environment – a Factor in Ensuring Research Quality. Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference. St. Petersburg, 2024. Pp. 495–499 (In Russian).

DETERMINING THE NUMBER OF PRIMARY ERRORS IN ROBOTIC SYSTEMS MECHANISMS

Khabibullina Leysan F., Khabibullin Fanil F., Kuznetsov Sergey P.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
55, Bolshaya Krasnaya st., Kazan, 420015, Russia, leisan_vafina19@mail.ru

This article discusses the most frequently used elements of kinematic pairs in the design of mechanisms. Possible primary errors for a point, line, and plane are presented. The number of primary errors of a connecting rod with elements of two rotary pairs is calculated, and a method for eliminating six primary errors from the total number of 22 found is proposed. Calculations are made relative to a spatial crank and 30 primary errors are identified, which are ultimately reduced to 22. After reducing the number of primary errors, laboratory models of spatial 4R mechanisms are designed and manufactured. The developed spatial 4R mechanisms are actively used in mechatronic installations and robotic systems. One example is an industrial disintegrator with drives based on spatial 4R mechanisms.

Keywords: primary error, calculation error, mechanism, kinematic pair, structural diagram.

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРНОГО МОСТА ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

*Чеснокова Мария Алексеевна, Нурмухаметов Даниль Илдарович,
Пономарев Роман Сергеевич, Терехина Татьяна Александровна,
Аптуков Валерий Нагимович*

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, mariachesnokova@psu.ru

В работе представлен метод изготовления волоконно-оптического датчика температуры на основе торцевого интерферометра Фабри-Перо, выполненного в виде полимерного «моста», часть которого является чувствительным элементом датчика. Основным материалом для создания чувствительной части является УФ-отверждаемая смола, прозрачная для оптического и ближнего инфракрасного диапазона. Путем моделирования определен оптимальный режим формирования полимерного «моста». Чувствительность исследуемого датчика составила ~ 44 пм/°С.

Ключевые слова: датчик температуры, оптическое волокно, интерферометр Фабри-Перо, полимерный мост.

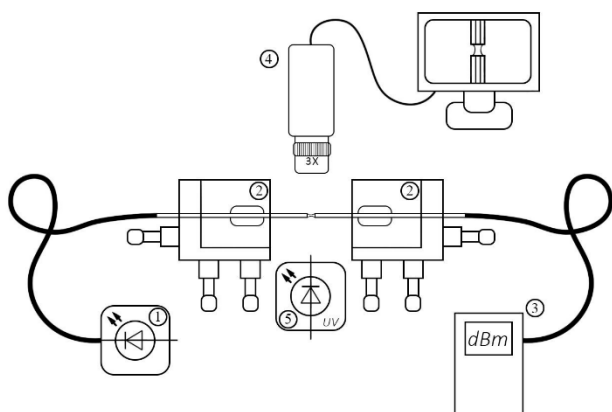
Введение

В волоконно-оптической сенсорике популярность приобрели точечные датчики на основе интерферометра Фабри-Перо, так как они обладают рядом преимуществ перед аналогами: простота конструкции, компактность, высокая чувствительность и хорошая работоспособность при высоких температурах [1, 2]. Однако компоненты для формирования чувствительной части таких датчиков как правило специфичны и имеют высокую цену, в связи с чем предлагается формировать интерферометр Фабри – Перо на торце оптического волокна из доступного фотополимерного материала.

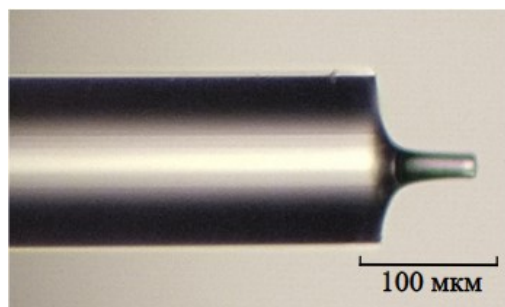
В качестве материала для чувствительной части датчика температуры был использован фоточувствительный полимер, который прозрачен для видимого света и ближайшего ИК-диапазона. Процесс формирования заготовки основан на технике формирования полимерного «моста» между торцами двух оптических волокон, схема установки представлена на рисунке 1а. За счет смачиваемости оптического волокна и сил поверхностного натяжения формируется полимерный «мост» между торцами оптических волокон. После полимеризации «моста» и его скалывания вблизи из одного из торцов, образуется «столбик» с плоским торцом. Таким образом, две границы раздела сред: оптическое волокно – полимер и полимер – воздух в совокупности формируют интерферометр Фабри-Перо на торце волокна (рис. 1б). Работоспособность и чувствительность датчика оценивалась по сдвигу спектра отражения (рис. 1в).

© Чеснокова М.А., Нурмухаметов Д.И., Пономарев Р.С., Терехина Т.А., Аптуков В.Н., 2025

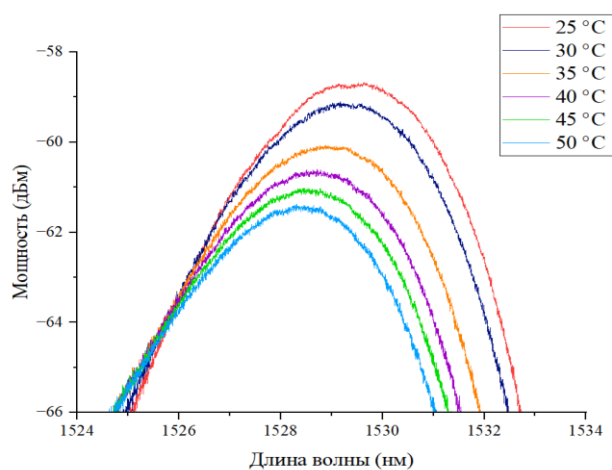
Исследование выполнено за счет средств Государственного задания №FSNF-2024-0001.



а



б



в

Рис. 1. а) схема установки формирования чувствительного элемента:
1 – источник излучения, 2 – микропозиционеры с волокнами, 3 – измеритель оптической мощности,
4 – микроскоп, 5 – источник УФ-излучения; б) фотография чувствительного элемента,
сформированного из полимера основе оптического клея A545;
в) спектр отраженного излучения при разных температурах

Для улучшения процесса формирования полимерных мостиков были проведены расчеты процессов деформации и отверждения стержня, используя условие постоянства напряжения:

$$\sigma_1 / \mu(D) = \Psi(t) - (\partial F / \partial D) \dot{D}(t),$$

где σ_1 – постоянное напряжение, μ – коэффициент вязкости, $D(t)$ – переменная доза облучения, $\Psi(t)$ – скорость изменения полной деформации.

При постоянной мощности облучения, по временной зависимости скорости деформации можно сделать вывод, что при меньших уровнях мощности облучения V_D и сохранении постоянного напряжения при определенных условиях можно достичь более высокого уровня деформации, то есть получить более длинный и тонкий «столбик».

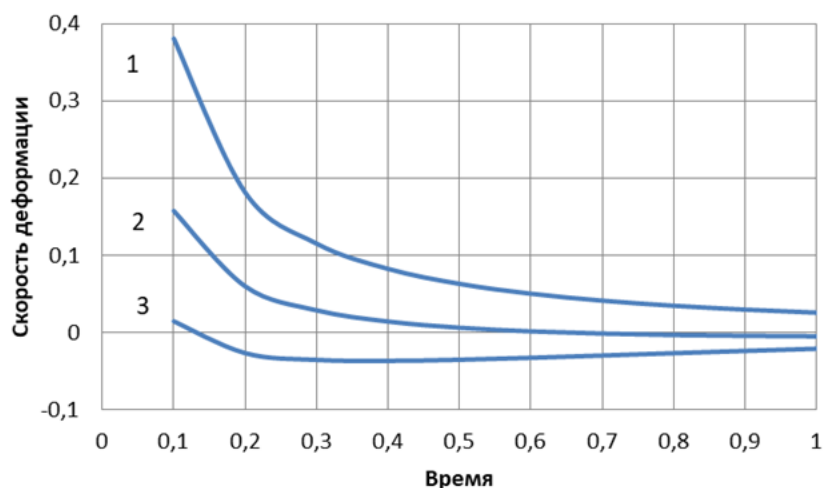


Рис. 2. Временная зависимость скорости деформации, требуемая для поддержания постоянного напряжения при $V_D = 0,5$ (кривая 1); 1,0 (кривая 2); 2,0 (кривая 3)

Закключение

В результате разработана технология формирования температурного датчика, чувствительный элемент, которого представляет собой торцевой интерферометр Фабри-Перо из полимерной смолы. Испытания показали, что с ростом температуры происходит сдвиг спектра излучения, который можно объяснить изменением длины интерферометра и показателя преломления полимера. Чувствительность исследуемого датчика составляет 44 пм/°С и превышает чувствительность классических волоконно-оптических датчиков (11 пм/°С). Путем математического моделирования были получены оптимальные режимы отверждения, позволяющие получить более длинный и тонкий чувствительный элемент.

Библиографический список

1. Yang M., Peng J., Wang G., Dai J. Fiber Optic Sensors Based on Nano-Films. In Fiber Optic Sensors; Matias, I.R., Ikezawa, S., Corres, J., Eds.; Smart Sensors, Measurement and Instrumentation; Springer International Publishing: Cham, 2017. Vol. 21. Pp. 1–30. ISBN 978-3-319-42624-2. DOI: 10.1007/978-3-319-42625-9_1. EDN: YINRLW.
2. Mohammed P.A., Wadsworth W.J. Long Free Standing Polymer Waveguides Fabricated Between Single-Mode Optical Fiber Cores. J. Light wave Technol., JLT 2015, 33, 4384-4389. DOI: 10.1109/JLT.2015.2471810. EDN: VFFPNZ.

References

1. Yang M., Peng J., Wang G., Dai J. Fiber Optic Sensors Based on Nano-Films. In Fiber Optic Sensors; Matias, I.R., Ikezawa, S., Corres, J., Eds.; Smart Sensors, Measurement and Instrumentation; Springer International Publishing: Cham, 2017. Vol. 21. Pp. 1–30. ISBN 978-3-319-42624-2. DOI: 10.1007/978-3-319-42625-9_1. EDN: YINRLW.
2. Mohammed P.A., Wadsworth W.J. Long Free Standing Polymer Waveguides Fabricated Between Single-Mode Optical Fiber Cores. J. Light wave Technol., JLT 2015, 33, 4384-4389. DOI: 10.1109/JLT.2015.2471810. EDN: VFFPNZ.

FORMATION OF OPTICAL POLYMER BRIDGE FOR FIBER-OPTIC TEMPERATURE SENSOR

*Chesnokova Maria A., Nurmukhametov Danil I., Ponomarev Roman S.,
Terekhina Tatyana A., Aptukov Valery N.*

Perm State University, 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia, mariachesnokova@psu.ru

The paper presents a method of fabrication of a fiber-optic temperature sensor based on an end-face Fabry-Perot interferometer made in the form of a polymer “bridge”, a part of which is a sensitive element of the sensor. The main material for creation of the sensitive part is UV-curable resin, transparent for optical and near-infrared range. The optimal mode of polymer “bridge” formation was determined by modeling. The sensitivity of the investigated sensor was ~ 44 pm/°C.

Keywords: temperature sensor, optical fiber, Fabry-Perot interferometer, polymer bridge.

Научное издание

Механика управления движением и робототехнические комплексы

Сборник статей по материалам I Всероссийской научно-практической
конференции с международным участием

(г. Пермь, ПГНИУ, 2–6 декабря 2024 г.)

Статьи публикуются в авторской редакции, авторы несут ответственность за
содержание статей, за достоверность приведенных в статье фактов, цитат, ста-
тистических и иных данных, имен, названий и прочих сведений.

Издается в авторской редакции
Компьютерная верстка: *Д. Р. Бакирова*

Объем данных 4,56 Мб
Подписано к использованию 3.03.2025

Размещено в открытом доступе
на сайте www.psu.ru
в разделе НАУКА / Электронные публикации
и в электронной мультимедийной библиотеке ELiS

Управление издательской деятельности
Пермского государственного
национального исследовательского университета
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15