

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 22

2021

№ 3

Издаётся с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:

БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.

ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.

ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:

АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН

БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН

ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН

ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН

КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН

КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН

КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН

ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН

РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН

СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН

СИГОВ А. С., акад. РАН

СОЙФЕР В. А., акад. РАН

СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН

ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН

ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН

ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН

ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН

ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:

DORANTES D. J., PhD, Турция

GROUMPOS P. P., PhD, Греция

ISIDORI A., PhD, Италия

KATALINIC B., PhD, Австрия

LIN CH.-Y., PhD, Тайвань

MASON O. J., PhD, Ирландия

ORTEGA R. S., PhD, Франция

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США

STRZELECKI R. M., PhD, Польша

SUBUDHI B. D., PhD, Индия

АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан

ГАРАЩЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина

ТРОФИМЕНКО Е. Е., д.т.н., Беларусь

БОБЦОВ А. А., д.т.н.

БУКОВ В. Н., д.т.н.

ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.

ЖУКОВ И. А., д.т.н.

ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.

КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.

ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.

ЛОХИН В. М., д.т.н.

ПУТОВ В. В., д.т.н.

ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.

РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.

СЕРГЕЕВ С. Ф., д.п.с.н.

ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.

ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.

ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:

АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Кычкин А. В., Николаев А. В. Архитектура киберфизической системы управления проветриванием подземного горнодобывающего предприятия на базе платформы Интернета вещей115

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Яковлев Д. С., Тачков А. А. Вероятность столкновения автономного мобильного робота с препятствием125

- Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Двухконтурная система с эталонной моделью для управления пространственным движением грузового необитаемого подводного аппарата134

- Finaev V. I., Medvedev M. Yu., Pshikhopov V. Kh., Pereverzev V. A., Soloviev V. V. Unmanned Powerboat Motion Terminal Control in an Environment with Moving Obstacles145

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА,
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- Сергеев А. А., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Управление автономной посадкой БПЛА самолетного типа на статическую и динамическую посадочные площадки по «гибким» кинематическим траекториям156

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в МНБД Scopus и RSCI (на платформе Web of Science).

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 22

2021

No. 3

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

PESHEKHONOV V. G.

REZCHIKOV A. F.

SCHERBATYUK A. F.

SEBRYAKOV G. G.

SIGOV A. S.

SOJFER V. A.

SOLOMENTSEV Yu. M.

VASSILYEV S. N.

YUSUPOV R. M.

ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan

DORANTES D. J., PhD, Turkey

GARASCHENKO F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

TROFIMENKO Ye. Ye., Belarus

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V.M.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEYEV S. F.

ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and perspectives development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

AUTOMATION AND CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES

- Kychkin A. V., Nikolaev A. V. Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform 115

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Iakovlev D. S., Tachkov A. A. Probability of Collision between Autonomous Mobile Robot with an Obstacle 125

- Filaretov V. F., Yukhimets D. A. Two-Loop System with Reference Model for Control of Spatial Movement of Cargo Underwater Vehicle 134

- Finaev V. I., Medvedev M. Yu., Pshikhov V. Kh., Pereverzev V. A., Soloviev V. V. Unmanned Powerboat Motion Terminal Control in an Environment with Moving Obstacles 145

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

- Sergeev A. A., Filimonov A. B., Filimonov N. B. Control of Autonomous Landing of UAV of Airplane-Type on the Static and Dynamic Sites with Using of "Flexible" Kinematic Trajectories 156

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

А. В. Кычкин, канд. техн. наук, доц., avkychkin@hse.ru,

НИУ Высшая школа экономики, филиал в г. Пермь,

А. В. Николаев, канд. техн. наук, доц., nikolaev0811@mail.ru,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Архитектура киберфизической системы управления проветриванием подземного горнодобывающего предприятия на базе платформы Интернета вещей¹

Рассматривается архитектура системы управления процессом проветривания подземных горнодобывающих предприятий (на примере калийного рудника), оснащенной цифровым двойником с онлайн функциями имитационного моделирования и предиктивной аналитики. Система ориентирована на реализацию управления главной вентиляционной установкой с учетом изменяющихся параметров наружного воздуха, подаваемого в шахтные стволы.

В отличие от существующих предложенный способ управления учитывает влияние параметров наружного воздуха на изменение общерудничной естественной тяги, от которой зависит общий объем воздуха, подаваемого в рудник. Известно, что системы проветривания таких предприятий потребляют от 30 до 50 % всей затрачиваемой на процесс добычи полезного ископаемого электроэнергии. В связи с этим разрабатываемая система, способная к анализу изменений общерудничной естественной воздушной тяги и, как следствие, объемов подачи воздуха, сможет работать в энергосберегающем режиме.

Предложенный способ управления включает в себя алгоритм расчета взаимосвязей физических параметров общерудничной естественной тяги, действующей между стволами; алгоритм расчета значения общерудничной естественной тяги; алгоритм расчета производительности и выбора требуемого режима работы ГВУ.

Для реализации способа предложена архитектура киберфизической системы (CPS) проветривания на базе платформы Интернета вещей (IoT) InfluxData стека TICK. Предложенная архитектура CPS состоит из четырех подсистем: подсистемы физического объекта, сетевой и вычислительной инфраструктур IoT, цифрового двойника, интерфейса пользователя.

Цифровой двойник системы проветривания выполнен с использованием базы данных временных рядов и базы данных атрибутов, хранящих сведения об изменении параметров оборудования во времени, показателях воздуха, индикаторах эффективности, статистике по авариям и наработке вентиляторов, характеристиках CPS и др. CPS данной архитектуры подразумевает подключение дополнительных источников данных, обеспечение расчетов рациональных объемов подачи воздуха с учетом правил безопасности и требований энергоэффективности.

Ключевые слова: киберфизическая система, Интернет вещей, цифровой двойник, система мониторинга и управления, системная архитектура, рудник, процесс проветривания, энергосбережение

Введение

В целях повышения рентабельности производства подземные горнодобывающие предприятия с каждым годом активно увеличивают объем добычи полезного ископаемого. В результате этого возрастает число проходимых горных выработок и добычных участков, в которые необходимо постоянно подавать свежий воздух.

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Пермского края в рамках проекта Международной исследовательской группы "Разработка цифровой модели прогнозирования и ценозависимого управления спросом на электроэнергию, потребляемую подземными горнодобывающими предприятиями", 2020 г.

Также увеличивается расстояние от воздухоподающих стволов до мест ведения горных работ, что приводит к необходимости увеличения объема подаваемого в рудник (шахту) воздуха [1–4]. На процесс проветривания подземных горнодобывающих предприятий расходуется от 30 до 50 % всей затрачиваемой на предприятии электроэнергии, а это десятки ГВт·ч за год.

Основной причиной огромного расхода электроэнергии является парадигма проветривания, основанная на наращивании объемов подаваемого в шахту (рудник) свежего воздуха, поддержания во всем этом объеме тепловых параметров, значения которых заведомо превышают (для надежности в условиях неуправ-

ляемого процесса) требуемые по критериям безопасности.

Методы управления воздухоподготовкой и проветриванием в настоящее время заключаются в поддержании заданного оператором главной вентиляционной установки (ГВУ) объемного расхода воздуха с использованием SCADA-приложений. Регулирование и оптимизация работы оборудования по критерию энергоэффективности не проводятся как в нормальном режиме проветривания, так и в режиме воздухоподготовки.

В связи с этим представляется актуальным создание архитектуры киберфизической системы (КФС, англ. CPS), способной интегрировать информационную и технологическую инфраструктуру системы вентиляции шахты (рудника) таким образом, чтобы все активные компоненты взаимодействовали друг с другом с помощью открытых интерфейсов и сетевых протоколов на основе технологий промышленного Интернета вещей (IoT), реализуя обработку больших объемов данных, визуализацию в режиме реального времени, прогнозную аналитику и динамическое управление [5–9].

Подземные горнодобывающие предприятия отличаются друг от друга по многим параметрам: глубине залегания полезного ископаемого, газоносности горных пород, мощности пласта и т.д. Поэтому для каждого типа и, иногда, для каждого конкретного подземного горнодобывающего предприятия необходимо разрабатывать системы управления с учетом специфических особенностей отдельной шахты (рудника).

Основная задача настоящей работы — предложить принцип построения киберфизической системы проветривания без привязки к конкретным подземным горнодобывающим предприятиям и их особенностям. Поэтому в работе реализация алгоритма проведена на примере калийного рудника с рядом допущений, которые в дальнейшем могут быть добавлены в модель при известных значениях упрощенных параметров.

Метод расчета естественной тяги между шахтными стволами

Для упрощения расчетов приняты следующие допущения:

1) плотность воздуха зависит от его температуры и давления, которые можно измерить

с помощью датчиков, для ее расчета также используется ряд коэффициентов [10, 11];

2) температура воздуха в околоствольном дворе вентиляционного ствола зависит от глубины рудника и практически не меняется с течением времени;

3) устья шахтных стволов находятся на одной высотной отметке;

4) число шахтных стволов на подземных горнодобывающих предприятиях может быть различным, поэтому значение объемного расхода воздуха для проветривания рудника определяется на этапе расчета требуемого режима проветривания. Контролируется это значение с помощью датчиков расхода воздуха, обязательно присутствующих в вентиляционном стволе и в каналах ГВУ;

5) значение аэродинамического сопротивления рудника изменяется в течение длительного отрезка времени, поэтому для определения его значения путем измерений можно выбрать интервал, например, раз в год. Если требуется точное его значение, то можно воспользоваться методикой расчета аэродинамического сопротивления рудника, описанной в работе [12];

6) не учитываются поверхностные утечки воздуха, возникающие при работе ГВУ;

7) воздухоподготовка (нагрев или охлаждение) поступающего в воздухоподающие стволы воздуха не проводится;

8) естественная тяга действует между сообщающимися выработками, в частности, между шахтными стволами (рис. 1) и может быть рассчитана по следующему алгоритму:

- при известных параметрах шахтных стволов их аэродинамическое сопротивление находится по формуле [11]

$$R_1 = \alpha_1 (KH_{ais}/S^{2,5}), \quad (1)$$

где $\alpha_1 = 0,096138$; H_{ais} — высота сообщающихся стволов, м; K — коэффициент, равный 3,28 для клетевых стволов, для скиповых и грузопассажирских — 3,93; S — сечение ствола, м²;

- по формуле (1) определяется аэродинамическое сопротивление всех стволов рудника;
- значение аэродинамического сопротивления подземной части рудника согласно работе [13] определяется по формуле

$$R_i = \frac{\Delta P_i N}{9,81 Q_i^2}, \quad (2)$$

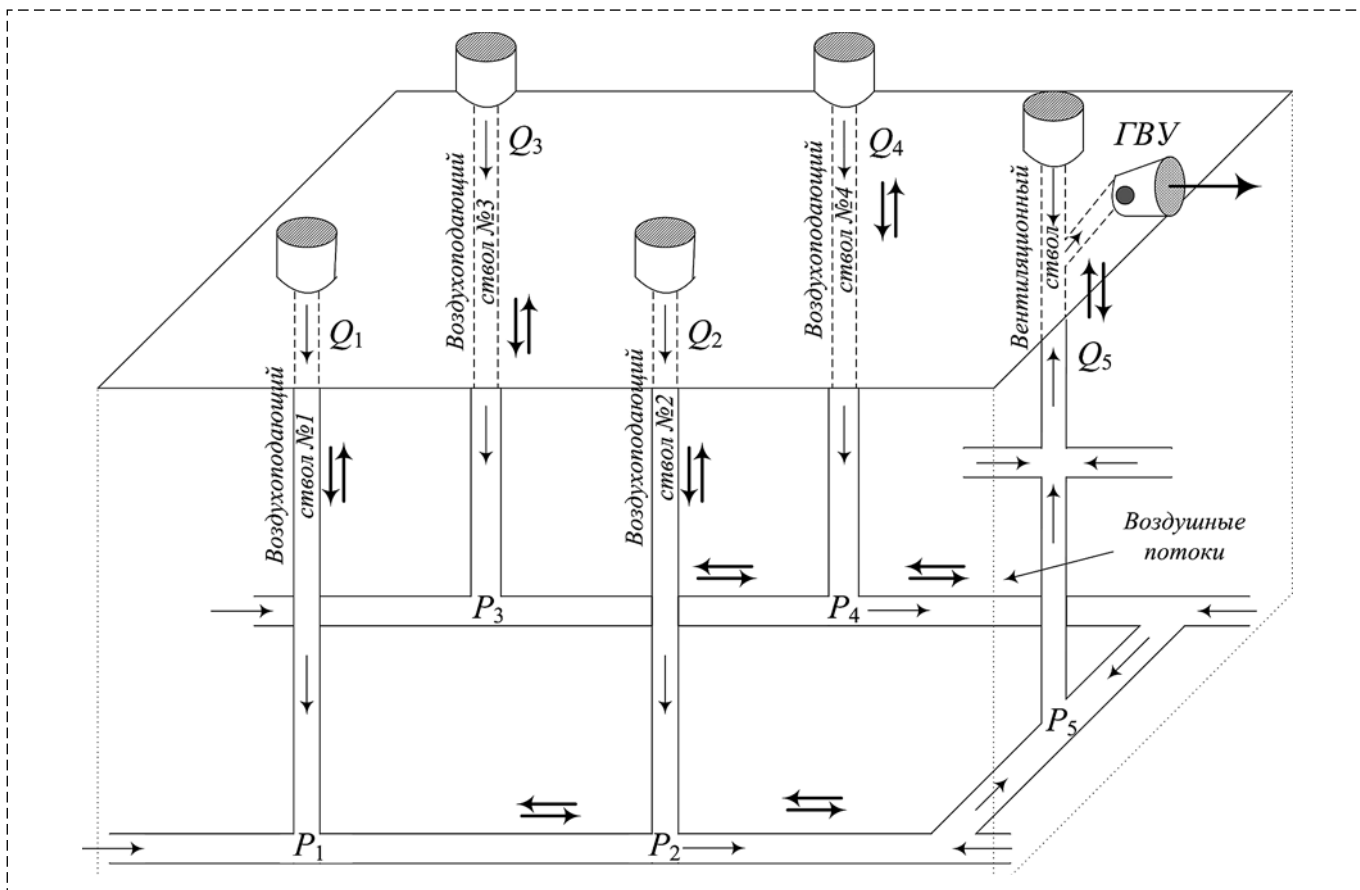


Рис. 1. Упрощенная схема воздухораспределения между шахтными стволами
Fig. 1. Simplified air distribution scheme between shafts

где ΔP_i — разность давлений между околоствольными дворами шахтных стволов, мм рт. ст.; N — коэффициент пересчета давления из мм рт. ст. в Па; Q_i — объемный расход воздуха, проходящего между стволами, $\text{м}^3/\text{с}$;

- после этого рассчитывается средняя плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$) в воздухоподающих стволах [11]:

$$\rho_1 = \frac{\alpha_2 [P_a (\alpha_3 + 2t_a - K_n H_{ais})] - \alpha_5 R_1 Q_1^2 (\tau + t_a)}{(\tau + t_a) [\tau + t_a + H_{ais} (K_n - \alpha_4)]}, \quad (3)$$

где $\alpha_2 = 0,2325$; $\alpha_3 = 546,3$; $\alpha_4 = 0,01705$; $\alpha_5 = 0,0075$; $\tau = 273,15$; P_a — атмосферное давление наружного воздуха, мм рт. ст.; t_a — температура воздуха, поступающего в ствол, $^{\circ}\text{C}$; K_n — температурный градиент, равный $0,00767$ $^{\circ}\text{C}/\text{м}$ [11]; R_1 — аэродинамическое сопротивление ствола, $(\text{Н} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^8$; Q_1 — объемный расход воздуха, поступающего в ствол, $\text{м}^3/\text{с}$;

- далее определяется средняя плотность воздуха в вентиляционном стволе [11]:

$$\rho_2 = A_1 [A_2 + A_3], \quad (4)$$

где

$$A_1 = \frac{\alpha_6 (\tau + t_c - H_{ais} (\alpha_3 - K_B))}{\tau + t_c - K_B H_{ais}};$$

$$A_2 = \frac{P_a + \alpha_3 \rho_1 H_{ais} - \alpha_4 (R_1 + R_2) Q_B^2}{\tau + t_c};$$

$$A_3 = \frac{P_a + \alpha_3 \rho_1 H_{ais} - \alpha_4 (R_1 + R_2 + R_3) Q_B^2}{\tau + t_c - K_B H_{ais}};$$

$\alpha_6 = 0,0735$; t_c — температура воздуха в околоствольном дворе ствола, $^{\circ}\text{C}$; R_2 — аэродинамическое сопротивление подземной части рудника, $(\text{Н} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^8$; R_3 — аэродинамическое сопротивление вентиляционного ствола, $(\text{Н} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^8$; K_B — температурный коэффициент, равный $0,00923$ $^{\circ}\text{C}/\text{м}$; Q_B — объемный расход воздуха, исходящий из ствола, $\text{м}^3/\text{с}$.

При известных значениях средних плотностей воздуха в стволах определяется значение естественной тяги $h_{e,i}$ между i -й парой стволов (например, между воздухоподающим и вентиляционным) [4]:

$$h_{e,i} = 9,81(\rho_1 - \rho_2)gH_{ais}, \text{ Па}. \quad (5)$$

Метод расчета общерудничной естественной тяги

На работу ГВУ оказывает влияние именно общерудничная естественная тяга. В работе [13] установлено, что значение общерудничной естественной тяги определяется как сумма естественных тяг, действующих между каждой парой стволов:

$$h_e = \sum_{i=1}^n \text{sign}(h_{ei}), \quad (6)$$

где sign — знак, определяющий направление естественной тяги, действующей между i -й парой шахтных стволов, определяемый разностью значений ρ_1 и ρ_2 ; n — число пар сообщающихся шахтных стволов.

Значение общерудничной естественной тяги находится как алгебраическая сумма всех рассчитанных естественных тяг, действующих между каждой i -й парой сообщающихся стволов. После того, как становится известно значение и направление общерудничной естественной тяги, можно определить степень ее влияния на работу ГВУ.

Метод расчета производительности и выбор требуемого режима работы ГВУ

Давление, развиваемое ГВУ, можно найти по формуле [10]

$$h_{\text{ГВУ}} = A + BQ_{\text{ГВУ}} + CQ_{\text{ГВУ}}^2, \quad (7)$$

где $Q_{\text{ГВУ}}$ — производительность ГВУ, $\text{м}^3/\text{с}$; A , B , C — коэффициенты, описывающие аэродинамическую характеристику ГВУ (находятся при расчете кривой характеристики по методу наименьших квадратов) [10, 11].

Ввиду того, что согласно ранее принятым допущениям поверхностные утечки воздуха не учитываются, здесь принимаем $Q_{\text{ГВУ}} = Q_{\text{В}}$.

Работая совместно с общерудничной естественной тягой, ГВУ создаст давление и разовьет производительность согласно зависимости

$$h_{\text{ГВУ}} + h_e = RQ_{\text{ГВУ}}^2 \text{ или} \\ A + BQ_{\text{ГВУ}} + CQ_{\text{ГВУ}}^2 + h_e = RQ_{\text{ГВУ}}^2.$$

Обозначив $A_1 = C - R_{\text{руд}}$; $C_1 = A + h_e$; $a = B/A_1$; $b = C_1/A_1$, определим производительность ГВУ с учетом действия общерудничной естественной тяги:

$$Q_{\text{ГВУ}} = -\frac{a}{2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b}. \quad (8)$$

Если тяга действует против направления движения воздуха, создаваемого ГВУ, то необходимо увеличивать ее производительность на величину h_e , если же общерудничная естественная тяга направлена согласно требуемому направлению движения воздуха, т. е. способствует проветриванию, то можно снизить производительность вентилятора на ее величину, уменьшив тем самым затраты электроэнергии на проветривание.

Значения коэффициентов A , B , C зависят от типа вентилятора ГВУ и его аэродинамических характеристик. Эти параметры практически неизменны, поэтому их значения заносятся в память системы управления. Каждому режиму вентилятора соответствует свое значение коэффициентов A , B , C .

При изменении общерудничной естественной тяги h_e программой пересчитывается требуемая производительность ГВУ с учетом ее действия (формула (8)). После этого режим работы ГВУ может быть изменен.

Синтез архитектуры CPS проветривания шахты (рудника) на базе платформы Интернета вещей InfluxData стека TICK

Данный стек предлагает разрабатывать различные IoT-приложения с помощью инструментов: T — Telegram, I — InfluxDB, C — Chronograf, K — Karpasitor. Комбинация инструментов TICK формирует платформу InfluxData как информационный агрегатор, которую можно дополнять приложениями и сервисами через подключения по открытым интерфейсам и протоколам.

Базовая функциональность InfluxData недостаточна для реализации функции управления, поэтому ее можно использовать лишь в качестве дополнения к существующей SCADA системе. Кроме этого, платформа не специализируется на управлении промышленным оборудованием в CPS подземных горнодобывающих предприятий, таком как вентиляторы и калориферные установки (нагреватели). Поэтому необходимо развитие CPS за счет цифрового двойника по аналогии с работой [14]. Упрощенная архитектура CPS проветривания рудника представлена на рис. 2.

CPS состоит из четырех подсистем: системы физического объекта, сетевой и вычислительной инфраструктур, цифрового двойника и человеко-машинного интерфейса. Базовым принципом построения целевой системы является понятие киберфизического управления, которое строится сетцентрически с центральным звеном накопления данных, анализа и управления [15, 16]. Центральное звено взаимодействует с интеллектуальными узлами оперативного управления на базе SCADA или интеллектуальными узлами циклического управления с помощью OPC-интерфейса или Modbus RTU.

Реализация приведенных алгоритмов в системе проветривания подземных горнодобывающих предприятий во многом пересекается с задачей поддержания неравновесной конфигурации температурного поля в системе сообщающихся друг с другом помещений (камер) с минимальными затратами энергии [17, 18]. Для построения таких тепловых моделей, так же как и для моделирования системы управления, часто используется пакет MATLAB [19, 20], который в условиях высокой интероперабельности компонентов CPS целесообразнее заменить на пакет OpenModelica.

Переход к открытым интерфейсам связи, протоколам IoT, например MQTT, и центральному звену, реализующему облачные вычисления, способствует снижению затрат на

важущих предприятий во многом пересекается с задачей поддержания неравновесной конфигурации температурного поля в системе сообщающихся друг с другом помещений (камер) с минимальными затратами энергии [17, 18]. Для построения таких тепловых моделей, так же как и для моделирования системы управления, часто используется пакет MATLAB [19, 20], который в условиях высокой интероперабельности компонентов CPS целесообразнее заменить на пакет OpenModelica.

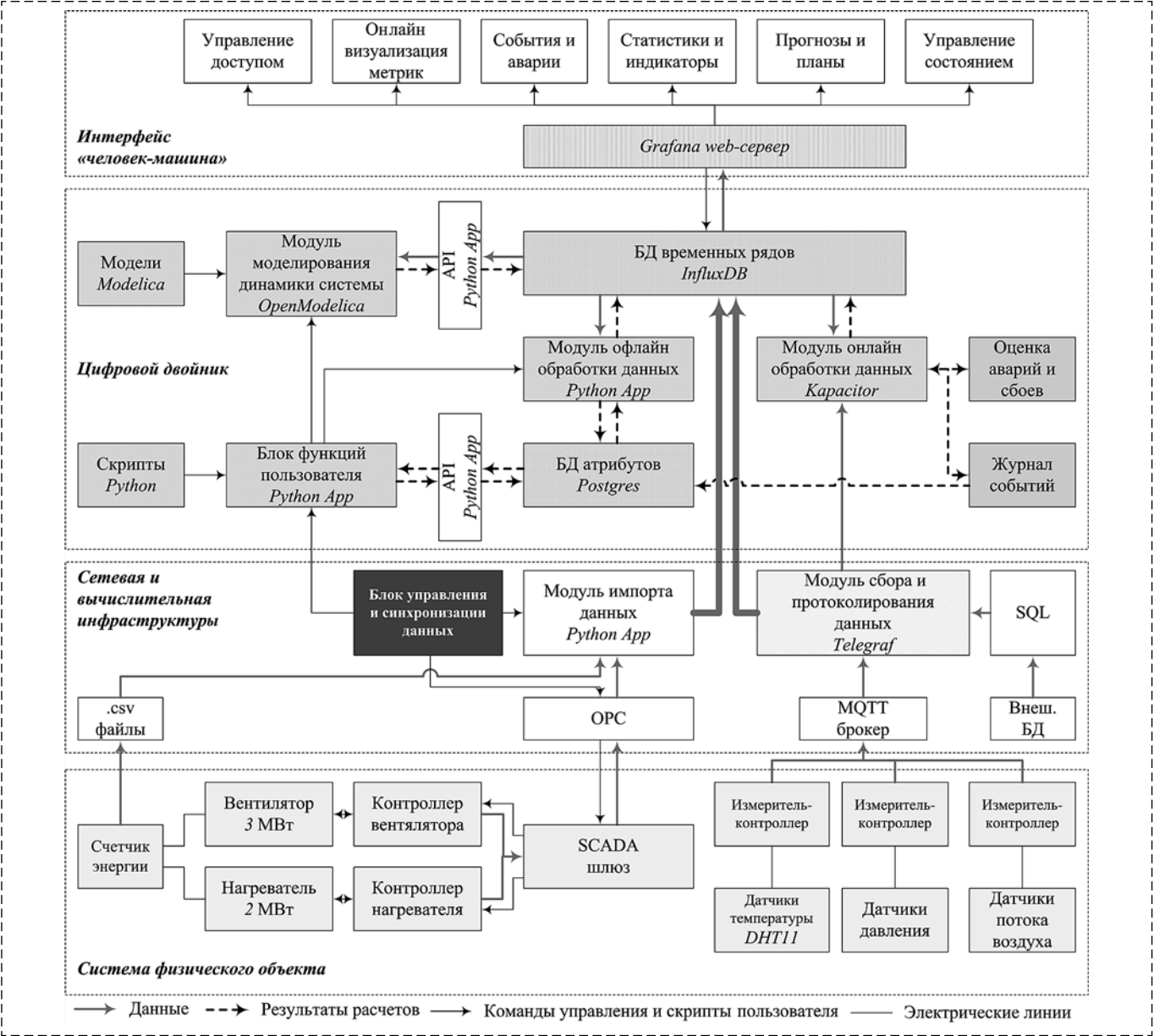


Рис. 2. Упрощенная архитектура CPS управления проветриванием рудника
Fig. 2. Simplified CPS architecture for mine ventilation control

проектирование, моделирование, внедрение и эксплуатацию технических объектов [9, 21]. В этом случае для решения задач энергосбережения могут быть использованы механизмы предиктивной аналитики [22], с реализацией на популярных Python-библиотеках Keras, TensorFlow и Padasip. Точный прогноз изменений параметров можно использовать для непрерывного регулирования технологического параметра по классическому алгоритму регулирования по обратной связи в дополнение к целевой функции энергопотребления [23, 24].

Сигналы управления для исполнительных контроллеров ГВУ можно формировать с помощью блока программного управления, в том числе с учетом команд оператора, как показано, например, в работе [25]. Определение переходных функций соответствующих каналов объекта управления целесообразно реализовать при идентификации реакции температурных показателей в руднике при ступенчатом воздействии на канал [26–28], по историческим данным в базе данных InfluxDB и журналу событий в Postgres.

Экспериментальное взаимодействие элементов цифрового двойника архитектуры CPS проветривания шахты (рудника)

Каждый рудник и шахта имеют свои особенности, и для управления проветриванием на этих предприятиях уже нельзя будет пользоваться допущениями, приведенными выше. Для того чтобы оценить, насколько согласуются известные и доказанные теории, описывающие динамику изменения параметров воздуха при его прохождении по стволам и горным выработкам подземных горнодобывающих предприятий, с данными, полученными в программе OpenModelica, была построена имитационная модель по упрощенной схеме проветривания калийного рудника (т.е. с вышеприведенными допущениями), приведенная на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

Параметры рудника приняты следующими: высота каждого из воздухоподающих стволов и вентиляционного ствола 400 м; диаметр всех вертикальных стволов 7 м; температура окружающей среды 20 °С; протяженность горизонтального ствола 1 — 50 м, горизонтального ствола 2 — 10 км; диаметр горизонтальных стволов 5 м; производительность ГВУ изменяется от 200 до 400 кг/с в момент времени $t = 600$ с.

В работе [10] доказано, что если устья стволов находятся на одной отметке и имеют одинаковую глубину, то между ними естественная тяга возникнуть не может. Однако, если принудительно (за счет ГВУ) начать закачку более теплого (легкого) воздуха в воздухоподающие стволы, а выкачивать более холодный (тяжелый) воздух по вентиляционному стволу, то между стволами возникнет общерудничная естественная тяга, зависящая от разности этих температур в стволах. Поэтому в модели, представленной на рис. 3 (см. вторую сторону обложки), определить общерудничную естественную тягу можно только при включенной ГВУ, а изменение воздухораспределения между стволами — при резком (скачкообразном) изменении режима работы ГВУ.

В работах [11, 29] установлено, что по мере движения воздуха по воздухоподающему стволу его температура за счет барометрического сжатия увеличивается каждые 100 м примерно на 1 °С. Результаты имитационного моделирования схемы, представленной на рис. 3, показывают, что за 400 м температура воздуха поднялась примерно на 3,5 °С, что близко к истинным значениям воздуха. Объяснить некоторое различие между полученными значениями можно несоответствием параметров реальных шахтных стволов (наличие в них расстрелов, подъемных сосудов и т.д.) представленным в модели трубам. Однако общая картина изменения температуры воздуха в стволах является адекватной.

Также в работе [30] установлено, что при изменении параметров ГВУ воздухораспределение между стволами меняется лишь через некоторое время. Связано это с инерционностью процесса проветривания: ввиду большой протяженности горных выработок от воздухоподающих стволов до вентиляционного ствола объемный расход воздуха в них изменится лишь спустя некоторое время (для каждого рудника разное) после изменения производительности ГВУ. Эту картину модель, показанная на рис. 3 (см. вторую сторону обложки), также успешно воспроизводит: при скачкообразном изменении производительности ГВУ объемный расход в воздухоподающих стволах изменяется плавно в течение некоторого времени.

В связи с этим можно сказать, что модель адекватно описывает происходящие в руднике процессы изменения воздухораспределения и параметров воздуха при регулировании режима работы ГВУ. При введении в модель допущений, устраненных ранее для упрощенной модели,

в дальнейшем для каждого конкретного подземного горнодобывающего предприятия будет возможно составлять адекватные модели, позволяющие моделировать процесс управления проветриванием при внесении правок в саму модель.

В качестве вычислительного эксперимента была решена задача прогнозирования профиля электрической мощности P на сутки вперед для системы вентиляции помещения с использованием входных данных от имитационной модели в программе OpenModelica. Для этого было реализовано информационное взаимодействие OpenModelica, расчетных моделей Python (библиотека Keras), базы данных InfluxDB и среды визуализации метрик Grafana. В ходе решения получена обучаемая прогностическая модель потребления электроэнергии, которая комбинирует классические модели путем адаптации их весов с помощью многослойного перцептрона. На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) приведены результаты экспериментальных расчетов за неделю в период с 22 по 29 января 2020 г. В число комбинируемых моделей входят простые модели на основе усреднения, сглаживающие модели, а также модели, учитывающие сезонность. Мерой оценки точности прогноза E является среднеквадратичная ошибка.

Используя предложенный в работе алгоритм расчета общерудничной естественной тяги с учетом изменяющихся и прогнозируемых ее значений по аналогии с предлагаемой экспериментальной методикой, можно управлять работой ГВУ в энергосберегающем режиме.

Заключение

Накапливаемая в InfluxDB информация об объекте за весь период эксплуатации используется для уточнения расчета общерудничной естественной тяги и регулирования производительности ГВУ в OpenModelica путем использования в модели экзогенных данных о прогнозе изменений параметров эксплуатации шахты (рудника) и параметров наружного воздуха. Таким образом, платформа представленной архитектуры позволит обеспечить предиктивное управление по заранее прогнозируемым параметрам, действующим на объекте, и компенсировать их в условиях инерционности процесса проветривания. Постоянная адаптация расчетов команд управления к реальности и прогнозу позволит непрерывно оптимизиро-

вать настройки алгоритма регулирования воздухообеспечением подземных выработок, гарантируя энергоэффективную работу локальных контуров регулирования вентиляторов.

Таким образом, для эффективной и безопасной работы системы проветривания в оптимальном режиме систему управления технологическими процессами на подземных горнодобывающих предприятиях можно рассматривать как CPS, реализующую передачу данных от уровня SCADA до уровня платформы Интернета вещей, их обработку и анализ с использованием предиктивных аналитик, а также выдачу управляющих сигналов на исполнительные механизмы (либо оператору ГВУ) с учетом имитационного моделирования динамических процессов воздухораспределения между горными выработками.

Список литературы

1. Lyalkina G. B., Nikolaev A. V., Makarychev N. S. Creation of the Information System Based on Experimental Data for Control of the MMF Operating Modes to Improve the Efficiency of Ventilation in Mines // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1059 Art. 012013. 8 p.
2. Алыменко Н. И., Николаев А. В., Каменских А. А., Петров А. И. Результаты математического моделирования смешивания холодного и теплого потоков воздуха в воздухоподающем стволе рудника // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 12. С. 31–33.
3. Aitao Z., Wang K. Role of gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation // Journal of Mining Science. January 2018. Vol. 54, Iss. 1. P. 111–119.
4. Lyalkina G. B., Nikolaev A. V., Makarychev N. S. Factors influencing strength and direction of natural ventilation pressure in general mines to control mine airing // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 795. 5 p.
5. Bin Xu et al. Analysis and Design of Real-time Micro-environment Parameter Monitoring System Based on Internet of Things // IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). 2016. P. 368–371.
6. Gubbi J. et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future generation computer systems. 2013. Vol. 29, N.7. P. 1645–1660.
7. Jell T. et al. BIG IoT — Interconnecting IoT Platforms from different domains // International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). 2017. P. 86–88.
8. Mijić D., Varga E. Unified IoT Platform Architecture Platforms as Major IoT Building Blocks // 2018 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet). 2018. P. 6–13.
9. Кычкин А. В., Артемов С. А., Белоногов А. В. Распределенная система энергомониторинга реального времени на основе технологии IoT // Датчики и системы. 2017. № 8–9. С. 49–55.
10. Alymenko N. I., Nikolaev A. V. Influence of mutual alignment of mine shafts on thermal drop of ventilation pressure between the shafts // Journal of Mining Science. 2011. Vol. 47, N 5. P. 636–642.
11. Мохирев Н. Н., Радько В. В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. М.: ООО Недра-Бизнесцентр, 2007. 324 с.

12. **Lyal'kina G. B., Nikolaev A. V.** Natural draught and its direction in a mine at the preset confidence coefficient // *Journal of Mining Science*, 2015. Vol. 51, № 2. P. 342–34.
13. **Алыменко Н. И., Николаев А. В.** Расчет эквивалентного аэродинамического сопротивления подземной части проектируемого рудника для определения естественной тяги, действующей между стволами // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2010. № 12. С. 68–69.
14. **Ajay Chhokra et. al.** Diagnostics and Prognostics Using Temporal Causal Models for Cyber Physical Energy Systems // 2017 ACM/IEEE 8th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs). DOI: 10.1145/3055004.3064843
15. **Кудж С. А., Цветков В. Я.** Сетецентрическое управление и киберфизические системы // *Образовательные ресурсы и технологии*. 2017. 2(19). С. 86–91.
16. **Цветков В. Я.** Распределенное интеллектуальное управление // *Государственный советник*. 2017. № 1. С. 16–22.
17. **Кузьмин В. А.** Оптимальное отопление: поддержание неравновесного поля температур в многокамерной системе с минимумом затрат энергии // *Программные системы: теория и приложения*. 2018. Т. 9, № 3(38). С. 29–47.
18. **Пуговкин А. В., Купреков С. В., Абушкин Д. В. и др.** Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения // *Доклады ТУСУРа*. 2010. № 2 (22). Ч. 1. С. 293–298.
19. **Панферов В. И., Анисимова Е. Ю., Нагорная А. Н.** К теории математического моделирования теплового режима зданий // *Вестник ЮУрГУ*. 2006. № 14. С. 128–131.
20. **Кычкин А. В., Даденков Д. А., Билалов А. Б.** Автоматизированная информационная система полунатурного моделирования статической нагрузки электроприводов // *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2013. № 8. С. 73–83.
21. **Hou L., Zhao S., Xiong X., Zheng K., Chatzimisios P., Hossain M. S., Xiang W.** Internet of Things Cloud: Architecture and Implementation // *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 45 (12). P. 32–39. DOI: 10.1109/MCOM.2016.1600398CM.
22. **Tao F. et al.** IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. Vol. 10, N. 2. P. 1547–1557.
23. **Кычкин А. В., Микрюков Г. П.** Метод обработки результатов мониторинга группы энергопотребителей // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2016. № 6. С. 9–14.
24. **Kelly S. D.T., Suryadevara N. K., Mukhopadhyay S. C.** Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes // *IEEE Sensors Journal*. 2013. Vol. 13, № 10. P. 3846–3853.
25. **Guan L.** Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings // *Building and Environment*. 2009. Vol. 44, N 4. P. 793–800.
26. **Ицкович Э. Л.** Современные алгоритмы автоматического регулирования и их использование на предприятиях // *Автоматизация в промышленности*. 2007. № 6. С. 39–44.
27. **Ротац В. Я.** Об адаптивных системах управления с текущей идентификацией // *Автоматизация в промышленности*. 2004. № 6. С. 3–6.
28. **Waczowicz S., Klaiber S., Bretschneider P., Konotop I., Westermann D., Reischl M., Mikut R.** Data mining to analyse the effects of price signals on household electricity customers // *Automatisierungstechnik*. 2014. Vol. 62. P. 740–752.
29. **Nikolaev A. V., Alymenko N. I., Kamenskikh A. A., Nikolaev V. A., Alymenko D. N., Petrov A. I.** Factors defining value and direction of thermal drop between mine shafts and impact of general mine natural draft on ventilation process of underground mining companies // *Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017): Proceedings of the Intern. Conf. Tomsk Polytechnic University*. Paris; Amsterdam; Hong Kong: Atlantis Press, 2017. P. 561–566.
30. **Nikolaev A., Alymenko N., Kamenskikh A., Nikolaev V.** The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts // *E3S Web of Conferences*. 2017. Vol. 15: The 1st Scientific Practical Conference International Innovative Mining Symposium (in memory of Prof. Vladimir Pronoza): proceedings. 7 p.

Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform

A. V. Kychkin, avkychkin@hse.ru,

Department of Information Technologies in Business, National Research University Higher School of Economics, Perm, Russia, 614070, Russian Federation,

A. V. Nikolaev, nikolaev0811@mail.ru,

Department of Mining Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, 614900, Russian Federation

Corresponding author: Kychkin A. V., PhD, Associate Professor, Department of Information Technologies in Business, National Research University Higher School of Economics, Perm, Russia, 614070, Russian Federation, e-mail: avkychkin@hse.ru

Accepted on December 03, 2020

The article considers the architecture of the ventilation control system for underground mining enterprises, equipped with a digital twin with online functions such as simulation modeling and predictive analytics. The system is focused on the main fan unit (MFU) control taking into account changing parameters of external air supplied to mine shafts. In contrast to the existing ones, the proposed method of control takes into account the influence of these parameters on changes in the total volume of natural draught, on which the total volume of air supplied to the mine (mine) depends. It is known that ventilation systems of such enterprises consume from 30 to 50 % of all electricity consumed for the mining process. In this regard, the proposed control models can be used to optimize energy costs and energy savings in ventilation. The Internet of things (IoT) InfluxData of stack TICK is offered for the realization. The offered architecture of cyber-physical system (CPS) consists of four subsystems: physical object subsystem, network and computing infrastructure IoT, digital twin, user interface. Architecture of CPS provides data processing from energy meters, control controllers and sensors of air environment parameters, implemented in blocks of on-line and off-line calculations. The digital twin of the ventilation system is made with the use of a time series database and a database of attributes that store information on changes in equipment

parameters by time, air indicators, performance indicators, statistics on accidents and fan runtime, CPS characteristics, etc. CPS of the given architecture means connection of additional data sources, providing calculations of rational volumes of air delivery taking into account safety norms and requirements of energy efficiency.

Keywords: cyber-physical system, Internet of Things, Digital Twin, monitoring and control system, system architecture, mine, ventilation, energy saving

Acknowledgements: The analysis has been carried out within the priority area of scientific development established by the National Research University Higher School of Economics in Perm — "Research on control methods in Cyber-Physical Systems".

For citation:

Kychkin A. V., Nikolaev A. V. Architecture of a Cyber-Physical System for the Mining Enterprise Ventilation Control Based on the Internet of Things Platform, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 115–123.

DOI: 10.17587/mau.22.115-123

References

1. Lyalkina G. B., Nikolaev A. V., Makarychev N. S. Creation of the Information System Based on Experimental Data for Control of the MMF Operating Modes to Improve the Efficiency of Ventilation in Mines, *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1059, Art. 012013, pp. 1–8.
2. Alymenko N. I., Nikolaev A. V., Kamenskikh A. A., Petrov A. I. Results of the mathematical modeling of the cold and warm air flows mixing in the air supply shaft of the mine, *Gornoe Oborudovanie i Elektromekhanika*, 2014, no. 12, pp. 31–33 (in Russian).
3. Aitao Z., Wang K. Role of gas ventilation pressure on the stability of airway airflow in underground ventilation, *Journal of Mining Science*, 2018, vol. 54, iss. 1, pp. 111–119.
4. Lyalkina G. B., Nikolaev A. V., Makarychev N. S. Factors influencing strength and direction of natural ventilation pressure in general mines to control mine airing, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 795, 5 p.
5. Xu Bin, Zheng Jianying, Wang Qing. Analysis and Design of Real-time Micro-environment Parameter Monitoring System Based on Internet of Things, *IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, 2016, pp. 368–371.
6. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, *Future generation computer systems*, 2013, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660.
7. Jell T., Bröring A., Mitic J. BIG IoT — Interconnecting IoT Platforms from different domains, *International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 2017, pp. 86–88.
8. Mijić D., Varga E. Unified IoT Platform Architecture Platforms as Major IoT Building Blocks, *2018 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet)*, 2018, pp. 6–13.
9. Kychkin A. V., Artemov S. A., Belonogov A. V. The distributed power monitoring system of a real time on the basis of IoT technology, *Datchiki i Sistemy*, 2017, no. 8–9, pp. 49–55 (in Russian).
10. Alymenko N. I., Nikolaev A. V. Influence of mutual alignment of mine shafts on thermal drop of ventilation pressure between the shafts, *Journal of Mining Science*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 636–642.
11. Mohirev N. N., Radko V. V. Engineering Calculations of Mine Ventilation. Construction. Reconstruction. Exploitation, Moscow, Nedra-Business Center, 2007, 324 p. (in Russian).
12. Lyalkina G. B., Nikolaev A. V. Natural draught and its direction in a mine at the preset confidence coefficient, *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 342–346.
13. Alymenko N. I., Nikolaev A. V. Calculation of the equivalent aerodynamic resistance of an underground part of the projected mine for determination of the natural thrust against the shafts, *Geologiya, Geofizika i Razrabotka Neftnykh i Gazovykh Mestorozhdenij*, 2010, no. 12, pp. 68–69 (in Russian).
14. Chhokra A., Hasan S., Dubey A., Mahadevan N., Karsai G. WiP Abstract: Diagnostics and Prognostics Using Temporal Causal Models for Cyber Physical Energy Systems, *2017 ACM/IEEE 8th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs)*, 2017, pp. 87–88.
15. Kuzh S. A., Tsvetkov V. Ya. Network centric control and the cyberphysical systems, *Obrazovatel'nye Resursy i Tekhnologii*, 2017, no. 2(19), pp. 86–91 (in Russian).
16. Tsvetkov V. Ya. Distributed intellectual management, *Gosudarstvennyj Sovetnik*, 2017, no. 1, pp. 16–22 (in Russian).
17. Kuz'min V. A. Optimal heating: maintenance of the non-equilibrium temperature field in the multichamber system with minimum energy consumption, *Programmnye Sistemy: Teoriya i Prilozheniya*, 2018, vol. 9, no. 3(38), pp. 29–47 (in Russian).
18. Pugovkin A. V., Kuprekov S. V., Abushkin D. V., Zarechnaya I. A., Muslimova N. I. Mathematical model of a space heat supply for the energy-saving ACS, *Doklady TUSUR*, 2010, no. 2 (22), part 1, pp. 293–298 (in Russian).
19. Panferov V. I., Anisimova E. Yu., Nagornaya A. N. To theory of a mathematical modeling of the building thermal mode, *Vestnik YUUrGU*, 2006, no. 14, pp. 128–131 (in Russian).
20. Kychkin A. V., Dadenkov D. A., Bilalov A. B. Automated information system of the semi-nature modeling of the electric drive static load, *Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, Informacionnye Tekhnologii, Sistemy Upravleniya*, 2013, no. 8, pp. 73–83 (in Russian).
21. Hou L., Zhao S., Xiong X., Zheng K., Chatzimisios P., Hossain M. S., Xiang W. Internet of Things Cloud: Architecture and Implementation, *IEEE Communications Magazine*, 2016, vol. 45 (12), pp. 32–39.
22. Tao F., Zuo Y., Xu L., Zhang L. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 1547–1557.
23. Kychkin A. V., Mikriukov G. P. Processing method for the monitoring results processing of the energy consumer group, *Energo-bezopasnost' i Energobezopasnost'*, 2016, no. 6, pp. 9–14 (in Russian).
24. Kelly S. D.T., Suryadevara N. K., Mukhopadhyay S. C. Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes, *IEEE Sensors Journal*, 2013, vol. 13, no. 10, pp. 3846–3853.
25. Guan L. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings, *Building and Environment*, 2009, vol. 44, no. 4, pp. 793–800.
26. Itskovich E. L. Modern algorithms of the automatic regulation and their use at the enterprises, *Avtomatizatsiya v Promyshlennosti*, 2007, no. 6, pp. 39–44 (in Russian).
27. Rotach V. Y. About adaptive control systems with current identification, *Avtomatizatsiya v Promyshlennosti*, 2004, no. 6, pp. 3–6.
28. Waczowicz S., Klaiber S., Bretschneider P., Konotop I., Westermann D., Reischl M., Mikut R. Data mining to analyse the effects of price signals on household electricity customers, *Automatisierungstechnik*, 2014, 62, pp. 740–752.
29. Nikolaev A. V., Alymenko N. I., Kamenskikh A. A., Nikolaev V. A., Alymenko D. N., Petrov A. I. Factors defining value and direction of thermal drop between mine shafts and impact of general mine natural draft on ventilation process of underground mining companies, *Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017): proceedings of the International Conference*, 2017, pp. 561–566.
30. Nikolaev A., Alymenko N., Kamenskikh A., Nikolaev V. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts, *The 1st Scientific Practical Conference International Innovative Mining Symposium (in memory of Prof. Vladimir Pronoza)*, 2017, vol. 15, p. 7.

ICR 2021

6th International Conference
on Interactive Collaborative Robotics
<http://specom.nw.ru/icr2021>

SEPTEMBER 27-30, 2021

ST. PETERSBURG,
RUSSIA

CONFERENCE

The International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR) was established as a satellite event of the International Conference on Speech and Computer (SPECOM) in 2016. The conference gathers together experts from different communities to discuss challenges of human and robot collaboration in industrial, social, medical, education and other areas. Fundamentals and means for collaborative behavior of one or multiple robots with physical interaction with people in operational environment equipped embedded sensor networks and cloud services in conditions of uncertainty and environmental variability are the main issues of the conference.

SUBMISSION OF PAPERS

Authors are invited to submit a full paper not exceeding 12 pages formatted in the LNCS style using the on-line submission system (www.easychair.org/conferences/?conf=specom2021). Those accepted will be presented either orally or as posters. The decision on the presentation format will be based upon the recommendation of three independent reviewers. ICR Proceedings will be published by Springer as a book in the Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI) series listed in all major citation databases such as DBLP, SCOPUS, EI, INSPEC, COMPENDEX.

TOPICS

- Assistive robots
- Child-robot interaction
- Collaborative robotics
- Educational robotics
- Human-robot interaction
- Medical robotics
- Robotic mobility systems
- Robots at home
- Robots control and communication
- Social robotics
- Safety robot behavior

IMPORTANT DATES

May 31, 2021 Submission of full papers
July 12, 2021 Notification of acceptance
July 25, 2021 Camera-ready papers and early registration
September 27-30, 2021 Conference dates

ORGANIZERS

- St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS, St. Petersburg, Russia)
- Technical University of Munich (TUM, Munich, Germany)

PROGRAMME COMMITTEE

Roman Meshcheryakov, Russia (Co-Chair)
Gerhard Rigoll, Germany (Co-Chair)
Andrey Ronzhin, Russia (Co-Chair)
Christos Antonopoulos, Greece
Branislav Borovac, Serbia
Sara Chaychian, UK
Ivan Ermolov, Russia
Oliver Jokisch, Germany
Dimitrios Kalles, Greece
Igor Kalyaev, Russia
Alexey Kashevnik, Russia
Dongheui Lee, Germany
Viktor Glazunov, Russia
Mehmet Guzey, Turkey
Evgeni Magid, Russia
Iosif Mporas, UK
Viacheslav Pshikhopov, Russia
Mirko Rakovic, Serbia
Yulia Sandamirskaya, Switzerland
Jesus Savage, Mexico
Hooman Samani, Taiwan
Evgeny Shandarov, Russia
Lev Stankevich, Russia
Tilo Strutz, Germany
Sergey Yatsun, Russia



SPC
RAS



Springer



CONTACTS

E-mail: specom@iias.spb.su
Web: <http://specom.nw.ru/icr2021>

Д. С. Яковлев, аспирант, yakovlevds@bmstu.ru, А. А. Тачков, канд. техн. наук, нач. отдела, tachkov@bmstu.ru,
НУЦ "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

Вероятность столкновения автономного мобильного робота с препятствием

Рассмотрена задача оценки вероятности столкновения с препятствием автономного мобильного робота, выполняющего движение по спланированной траектории. Проведены обзор и анализ методов решения данной задачи. Показано, что рассмотренные методы базируются на использовании периодически обновляемых клеточных карт проходимости (сеток занятости). Разработан новый метод оценки вероятности столкновения мобильного робота с препятствием, базирующийся на использовании клеточной вероятностной карты, в каждой ячейке которой хранится значение оценки вероятности нахождения в ней препятствия, и условной вероятности накрытия клеток карты с учетом возможных боковых и угловых отклонений мобильного робота от спланированной траектории (координатного закона накрытия клетки), обусловленных динамическими характеристиками системы управления движением. Для построения вероятностной карты использована динамически обновляемая многослойная карта проходимости, в которой каждый слой, за исключением результирующего, заполняется данными от классификаторов внешней среды, обрабатывающих информацию от информационно-измерительной системы мобильного робота. Результирующий слой представляет собой результат байесовского вывода по данным остальных слоев. Система управления движением автономного мобильного робота обеспечивает построение многослойной карты проходимости, карты вероятностей нахождения препятствий, определение координат робота, планирование траектории, контроль за следованием робота по ней и вычисление вероятности столкновения с препятствием.

Выполнена программная реализация разработанного метода оценки вероятности столкновения мобильного робота с препятствием в виде встраиваемого модуля в среде ROS (Robot Operating System). Приведено описание натурных экспериментов с мобильным роботом при возникновении на пути его следования перемещаемого препятствия. Приведены результаты анализа изменения вероятности столкновения робота с препятствием, и дана интерпретация результатов экспериментов. Обоснована необходимость вычисления вероятности столкновения мобильного робота с препятствием для оценки риска как основного показателя безопасности системы управления движением. Дана оценка результатам данной работы в решении задачи обеспечения безопасности движения автономных мобильных роботов.

Ключевые слова: автономность, безопасность движения, вероятность столкновения с препятствием, обеспечение безопасности, мобильный робот, система управления движением, риск, аварийная ситуация

Введение

Проблема обеспечения безопасного движения мобильных роботов (МР) является весьма актуальной в последнее десятилетие. Это связано, в первую очередь, с разработкой беспилотных транспортных средств, которые должны функционировать в городской среде. В работах, посвященных данной проблеме, как правило, анализируются риски возникновения аварийных ситуаций при движении беспилотных средств на общественных дорогах [1–9]. В работах [3–6] под "аварийной ситуацией" понимается столкновение мобильного робота с другими объектами окружающей среды. Чтобы избежать таких столкновений, МР должен уметь определять форму препятствий и их местоположение. Для динамических препят-

ствий дополнительно требуется определение и предсказание скорости и направления их движения на основе кинематической модели [1]. Такое предсказание осуществляется с использованием данных от информационно-измерительной системы (ИИС), которые, как правило, содержат случайные ошибки. В связи с этим многие исследователи в области безопасности движения МР прибегают к использованию вероятностного подхода для определения местоположения препятствий [9] и предсказания их движения на основе статистических данных [5]. Вероятностный подход особенно эффективен в случае применения МР или беспилотных средств на общественных дорогах, для предсказания поведения других участников движения [6, 10], а также для моделирования возникновения аварийной ситуации [4].

В работе [11] был проведен анализ методов оценки и обеспечения безопасности МР и сделан вывод о целесообразности ее количественной оценки на основе вероятностного подхода. В качестве количественной оценки было обосновано применение показателя безопасности — риска возникновения аварийной ситуации с участием мобильного робота [12]:

$$R = PW, \quad (1)$$

где P — вероятность возникновения аварии (столкновения с препятствием), W — ущерб от попадания мобильного робота в аварию.

На основе анализа значения риска R принимается решение о необходимости осуществления маневра МР для предотвращения столкновения с препятствием. Например, в случае превышения предельного значения риска $R > R_{\max}$ мобильному роботу необходимо переходить в режим экстренного торможения. Как видно из формулы (1), показатель риска зависит от вероятности P столкновения с препятствием и ущерба W от этого столкновения.

Ущерб W возникает только после наступления события "столкновение с препятствием" и зависит, например, от скорости МР, угла между вектором его скорости и препятствием, скорости движения препятствия, а также других существенных обстоятельств столкновения.

Таким образом, для определения риска необходимо знать оценку вероятности возникновения аварии, поэтому настоящая работа посвящена методу определения вероятности столкновения мобильного робота с препятствием.

Постановка задачи

Задача определения вероятности столкновения МР с препятствием рассматривается в следующей постановке. Мобильный робот перемещается в ограниченной области $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ по спланированной траектории $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$, $t \in [0, T]$. Модель движения робота задана системой дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0,$$

$\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ — вектор состояний робота, $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ — вектор управления, $\mathbf{x}_0(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ — вектор начальных состояний робота при $t = 0$.

В области Ω имеются $k = 1, \dots, K$ дискретных препятствий, координаты $\omega^{(k)} = (\omega_x^{(k)}, \omega_y^{(k)}) \in \Omega$ которых оцениваются с помощью ИИС мо-

бильного робота. Часть препятствий $M \leq K$ могут быть динамическими. Расположение k -го препятствия задается распределением вероятности $p_k(\omega)$ его координат, что позволяет учесть изменение в результате любого возможного движения в интервале времени $[0, \dots, T]$ и смоделировать неопределенность в измерениях ИИС. Также принимается допущение, что расположение двух препятствий взаимно независимо, что следует из условия независимости проводимого наблюдения и обнаружения препятствия с помощью ИИС.

Необходимо найти вероятность $P(t)$ столкновения робота с любым из K препятствий.

Методы определения вероятности столкновения с препятствием

Существует ряд подходов к определению вероятности столкновения робота с другими объектами окружающей среды: с помощью моделирования поведения объектов на основе марковских процессов [6, 10], предсказание поведения участников движения на основе вероятностных моделей [4], на основе анализа карты окружающей среды [13, 14].

Следует заметить, что перечисленные подходы базируются на дискретном представлении (замощении) области Ω одинаковыми квадратами (клетками) со стороной h , при этом каждая клетка ω_{ij} и ее координаты (i, j) неразличимы, а пересечение клеток может осуществляться только по ребрам [15]:

$$\begin{aligned} \Omega_h &= \{\omega_{ij} \mid (i, j) \in I_h \subset \mathbb{Z}^2, \mu(\omega_{ij} \cap \omega_{kl}) = \\ &= \emptyset, (i, j) \neq (k, l), \Omega \subseteq \bigcup_{(i,j) \in I_h} \omega_{ij}\}, \\ \Omega_h &= \bigcup_{(i,j) \in I_h} \omega_{ij}, \end{aligned}$$

где $\mu(\omega_{ij} \cap \omega_{kl})$ — условие попарного непересечения клеток в области Ω_h .

Такое представление является базовым для построения карт проходимости, или сеток занятости [14], которые используются для определения вероятности столкновения робота с препятствиями. В карте проходимости каждая клетка, как правило, принимает дискретное значение. Например, в работе [16] предложено использование карты $Occ(\omega_{ij})$, в которой каждая ячейка ω_{ij} находится в одном из двух состояний: "занята" ($\omega_{ij} = 1$) или "не занята" ($\omega_{ij} = 0$). $Occ(\omega_{ij})$ используется для построения

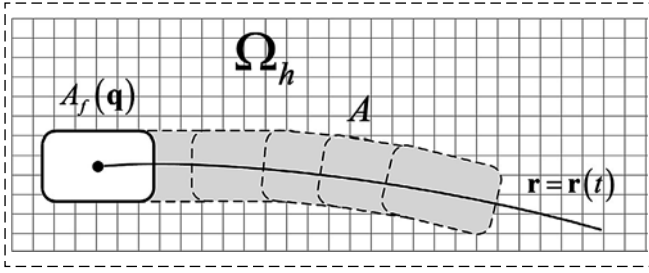


Рис.1. Движение робота по траектории
Fig. 1. Mobile robot's trajectory movement

карты, в каждой ячейке которой содержится значение вероятности $P(\omega_{ij} = 1)$ нахождения ячейки ω_{ij} в состоянии "занята". На основе подобной, но периодически обновляемой, карты $M(t)$ в работе [13] рассматривалась задача определения вероятности столкновения МР как со статическим P_{cs} , так и динамическим P_{cd} препятствием. Предполагается, что определено конфигурационное пространство $\mathcal{C}$ МР (совокупность значений всех его обобщенных координат: положение и ориентация робота) как специальная евклидова группа $SE(2)$ [16], компактная область $A_f(q) \subset \Omega_h$, занимаемая роботом (рис. 1), $q \in \mathcal{C}$. Область A , которую занимает робот при движении по траектории $r = r(t)$ за интервал времени $\tau = t_2 - t_1$, определяется как

$$A = \bigcup_{t \in [t_1, t_2]} A_f(r(t)), A \subset \Omega_h.$$

Тогда, согласно работе [13] вероятность столкновения P_{cs} со статическим препятствием ищется как

$$P_{cs} = \max_A (P(\omega_{ij} = 1)).$$

Для вычисления вероятности столкновения P_{cd} с динамическим препятствием m в работе [13] вводится понятие области o_m потенциального взаимодействия между роботом и препятствием (рис. 2, а, см. третью сторону обложки).

Вероятность столкновения с динамическим препятствием в момент времени t аппроксимируется вероятностью

$$P_{cd}(o_m) = P(o_m(t) \cap A \neq \emptyset, \forall t \in [t_1, t_2]),$$

$$P_{cd}(o_m) = \sum_{n=1}^N w_{mn} [P_{cd}(o_m, n) + P_{ps}(o_m, n)(1 - P_{cd}(o_m, n))],$$

где $P_{ps}(o_m, k) = \int_A PS(o_m(t))$ — вероятность попадания робота в область препятствия (круг

радиусом 1,2 м); $PS(o_m(t))$ — модель области препятствия с центром в o_m ; $P_{cd}(o_m, n) = \int G(o_m(t), \mu_n, \Sigma_n)$ — вероятность столкновения с препятствием, движущимся по шаблону n ; $G(o_m(t), \mu_n, \Sigma_n)$ — гауссовский процесс, представляющий движение препятствия по одному из возможных шаблонов n (шаблон n — одна из моделей движения препятствия, составленная с учетом собранных статистических данных); w_{mn} — вес шаблона n для препятствия m ; μ_n — математическое ожидание; Σ_n — ковариация; N — число всех возможных шаблонов движения препятствия m .

Вероятность l -го перехода робота в область o_m равна $PZ_l = \max_A (g_{C_l, S_l}(\omega_{ij}))$, где $g_{C_l, S_l}(\omega_{ij})$ — двумерная гауссова функция для клетки ω_{ij} с ковариационной матрицей S_l и центром пространства o_m в точке C_l (рис. 2, а, см. третью сторону обложки). При этом вероятность столкновения с динамическим препятствием за все время движения робота определяется как

$$P_{cd} = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{cd}(o_m)) \prod_{l=1}^L (1 - PZ_l).$$

Полная вероятность столкновения с любым возможным препятствием во время движения робота вычисляется по формуле

$$P_c = P_{cs} + (1 - P_{cs})P_{cd}. \quad (2)$$

Таким образом, появляется возможность оценить вероятность столкновения робота со статическими препятствиями на основании построенной на момент оценки карты окружающей среды робота. Переменным элементом карты являются динамические объекты, для вычисления вероятности столкновения с которыми предлагается проводить предсказание их движения на основании наблюдений за их поведением.

Как отмечается в работе [5], многие алгоритмы планирования предлагают N вариантов траекторий движения. При наличии K препятствий в зоне действия робота вычислительная нагрузка при оценке вероятности по формуле (2) равняется $O(NK)$. Авторы работы [5] предлагают подход, вычислительная нагрузка которого будет равняться $O(N + K)$. Для оценки вероятности столкновения с препятствием в работе [6] вводится ограничение $\bar{P}_D \leq P_D = P_c$, которое для точечных препятствий вычисляется как $\bar{P}_D = \int \sum_{k=1}^K p_k(\omega)$.

Для всего набора препятствий K в рабочем пространстве робота, занимающего множество точек $B_k \subset A$ (рис. 2, б, см. третью сторону обложки), вычисляется $G(\omega) = \sum_{k=1}^K \frac{1}{S_{B_k}} I_{B_k}(\omega) * p_k(\omega)$

(где S_{B_k} — площадь области, занимаемой множеством точек B_k ; $I_{B_k}(\omega)$ — индикатор множества B_k ; $f(\omega) * g(\omega)$ — свертка функций в клетке ω), для препятствий $B_k \subset A$ выделяется ограничивающий контур $\partial B_{k,\sigma}(\omega) = \nabla g_\sigma(\omega) * I_{B_k}(\omega)$ и вычисляется $\partial G_\sigma(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \partial B_{k,\sigma}(\omega) * p_k(\omega)$ (где $g_\sigma(\omega)$ — нормализованная двумерная функция Гаусса). Для каждого пути из N вычисляется $\partial A_\sigma(\omega) = \nabla g_\sigma(\omega) * I_A(\omega)$ вокруг A . Вероятность столкновения робота с препятствием оценивается как $F_D \geq \bar{P}_D \geq P_D$:

$$F_D = \int_{A_k} \partial A_\sigma(\omega) \partial G_\sigma(\omega) + \int_{A_k} I_A(\omega) G(\omega),$$

где $I_{A_k} \leq \frac{1}{2} \partial A_\sigma * \partial \tilde{B}_{k,\sigma} + \frac{1}{S_{B_k}} I_A * \tilde{I}_{B_k}$ — индикатор расширенной суммой Минковского области A (рис. 2, б, см. третью сторону обложки).

Необходимо учитывать тот факт, что оценка вероятности столкновения робота с препятствием в рассмотренных работах проводится на основе анализа построенной до начала движения карты статических препятствий окружающей среды. Таким образом, робот движется по априори известной карте, неопределенность в которой составляют только динамические препятствия. Также общим в рассмотренных выше подходах является поиск оценки вероятности столкновения на этапе планирования траектории $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$, без анализа возможного отклонения робота от этой траектории во время его движения, которая характеризуется динамической ошибкой системы управления робота.

Предлагаемый нами метод оценки вероятности столкновения с препятствием в отличие от рассмотренных имеет два ключевых отличия:

- для анализа препятствий в каждый момент времени t применяется динамически обновляемая многослойная карта проходимости, каждый слой которой заполняется отдельными классификаторами ИИС и характеризуется своей матрицей правдоподобия, что позволяет получать более достоверную оценку вероятности нахождения препятствия в клетке ω_{ij} ;
- учитываются возможные отклонения МР от спланированной траектории $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$.

Определение вероятности нахождения препятствия в заданной клетке карты на основе многослойной карты препятствий

Многослойной картой в момент времени t , по аналогии с рассматриваемым в работе [15] "ландшафтом", будем называть множество классов клеток определенного подмножества покрытия

$$\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl) = \{(c_{ij}, s) | c_{ij} = c(t, \omega_{ij}, s), \\ \omega_{ij} \in \Omega_h, s = \overline{0, lr}, lr \in \mathbb{N}\},$$

такого, что функция $c(\cdot)$ принимает на $\{\omega_{ij} | i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$ не более cl значений, причем к классу b принадлежит N_r клеток, т. е. $\sum_{b=1}^{cl} N_b = |\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl)|$. Карта $\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl)$ образована $(lr + 1)$ -клеточной плоскостью: результирующим слоем $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl) = \{(c_{ij}, 0) | c_{ij} = c(t, \omega_{ij}, 0), \omega_{ij} \in \Omega_h\}$ и слоями $\mathcal{L}_s(\Omega_h, cl)$, которые формируются независимо работающими классификаторами внешней среды на основе данных ИИС:

$$\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl) = \mathcal{L}_0(\Omega_h, cl) \cup \bigcup_{s=1}^{lr} \mathcal{L}_s(\Omega_h, cl).$$

Но в отличие от известных решений, использующих многослойные карты [18, 19], значение c_{ij} в клетке $(i, j) \in \Omega_h$ результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ рассчитывается по данным клеток (i, j) слоев $\mathcal{L}_s(\Omega_h, cl)$ в соответствии с формулой Байеса:

$$c_{ij} = \arg \max_{b=1,2,\dots,cl} \left(\frac{P(c_{ij}^{(b)}) P(D | c_{ij}^{(b)})}{\sum_{k=1}^{cl} P(c_{ij}^{(k)}) P(D | c_{ij}^{(k)})} \right), \quad (3)$$

где верхний индекс в записи $c_{ij}^{(b)}$ обозначает, что c_{ij} соответствует классу b ; $D = \{(c_{ij}, s) = \mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl; i, j) | s = \overline{1, lr}\}$; $P(c_{ij}^{(b)})$ — априорная вероятность появления класса b в клетке (i, j) ; $P(D | c_{ij}^{(b)})$ — условная вероятность появления совокупности значений D в слоях $s = \overline{1, lr}$, если в действительности в клетку (i, j) попадает объект класса b .

Обновление результирующего слоя карты выполняется с периодом Δt на интервале времени $[0, T]$.

Таким образом, на первом этапе определения вероятности столкновения с препятствием P оценивается, в каком состоянии находится каждая (i, j) ячейка результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ по формуле (3) на основе совокуп-

ности значений D всех классификаторов. На этом же этапе осуществляется планирование опорной траектории движения $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ по данным результирующего слоя.

На втором этапе необходимо определить вероятность нахождения препятствия в ячейке (i, j) .

В общем случае существует подмножество $CL_{ac} \subseteq CL$ ($CL = \{1, 2, \dots, cl\}$) классов объектов, столкновения с которыми приводят к аварийной ситуации, и подмножество $CL_B \subseteq CL$ классов объектов, не приводящих к аварийной ситуации. При этом $CL_{ac} \cap CL_B = \emptyset$. В дальнейшем будем считать, что классы из подмножества CL_{ac} не различимы между собой. Для определенности будем обозначать любой из классов подмножества CL_{ac} как q , а из подмножества CL_B — как $\bar{q}$.

Из-за погрешности измерений в ИИС найденная оценка класса q в клетке $(i, j) \in \Omega_h$ результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ соответствует классу $q \in CL_{ac}$ в действительности с вероятностью p_{ij} . Тогда по данным результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ можно определить однослойную карту $\mathcal{P}(\Omega_h, cl) = \{p_{ij} \mid p_{ij} = p(t, \omega_{ij}), \omega_{ij} \in \Omega_h\}$, содержащую информацию о вероятности правильной классификации q , где функция $p(\cdot)$ принимает на $\{\omega_{ij} \mid i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$ значения в диапазоне $[0, 1]$.

Поскольку карта $\mathcal{P}(\Omega_h, cl)$ также динамически обновляемая, то препятствия в каждой клетке классифицируются в каждый момент времени

$$\tau \in [T_0^{c_{ij}}, T_0^{c_{ij}} + \Delta t, T_0^{c_{ij}} + 2\Delta t, \dots, \dots, T_0^{c_{ij}} + k\Delta t, \dots, T^{c_{ij}}],$$

где $[T_0^{c_{ij}}, T^{c_{ij}}]$ — интервал время нахождения клетки (i, j) в зоне видимости ИИС робота, причем результаты всех классификаций независимы между собой.

Тогда на k -м шаге классификации вероятность p_{ij} можно определить следующим образом [20]:

$$p_{ij}^{(k)} = p_{ij}(q \mid \hat{q}_k) = \frac{p(\hat{q} \mid q)p_{ij}(q \mid \hat{q}_{k-1})}{p(\hat{q} \mid q)p_{ij}(q \mid \hat{q}_{k-1}) + p(\hat{q} \mid \bar{q})p_{ij}(\bar{q} \mid \hat{q}_{k-1})}. \quad (4)$$

Таким образом, формирование $\mathcal{P}(\Omega_h, cl)$ позволяет определить вероятность обнаружения приводящих к столкновению объектов класса $q \in CL_{ac}$ на результирующем слое $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$.

Вероятность столкновения робота с препятствием

Пусть в каждый момент времени $t \in [0, T]$ МР занимает компактное множество $A_f(\mathbf{q}) \subset \Omega_h$, $\mathbf{q} \in \mathcal{C}$. Определено вероятностное пространство $(E, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, где E — конечное множество элементарных исходов; $\mathcal{F}$ — сигма-алгебра подмножеств E — событий; $\mathbb{P}$ — вероятностная мера. Тогда, учитывая динамику системы управления движением МР, при его следовании по спланированной траектории $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$, можно определить случайную реализацию (элементарный исход) $e \in E$ процесса движения — занимаемое им случайное подмножество $A_e = \bigcup_{t \in [\tau, \tau + \delta]} A_f(\mathbf{r}_e(t)) \subset \Omega_h$

за интервал времени δ . Другими словами, при движении за время δ с учетом всех возможных боковых и угловых отклонений от спланированной траектории (рис. 3) — ансамбля случайных реализаций процесса движения — МР будет принадлежать случайному подмножеству $A_r = \bigcup_{e \in E_r} A_e$ множества Ω_h , $E_r \subseteq E$ — подмножество возможных траекторий движения робота.

При этом вероятность накрытия МР клетки ω_{ij} за время δ равна

$$P_{\omega_{ij}}^{\text{cov}}(\omega_{ij} \in A_r) = \mathbb{P}(\{e : \omega_{ij} \in A_r(e)\}). \quad (5)$$

Вычисление вероятности $P_{\omega_{ij}}^{\text{cov}}$ непосредственно по формуле (5) затруднительно, поэтому ее удобнее рассматривать как условную вероятность $p(\omega_{ij} \mid \theta)$ накрытия клетки, отстоящей на расстоянии θ от спланированной траектории (от ближайшей точки траектории) (рис.3). В этом случае вероятность $P_{\omega_{ij}}^{\text{cov}} = p(\omega_{ij} \mid \theta)$ можно интерпретировать аналогично координатному закону поражения цели, который характеризует вероятность поражения элементарной цели при условии, что точка попадания средства поражения относительно цели имеет заданные координаты [21]. Примеры координат

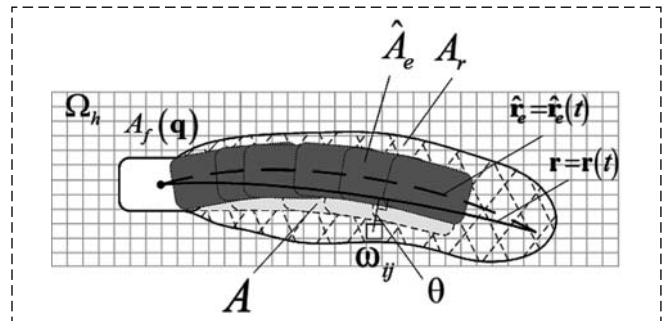


Рис. 3. Отклонение фактической траектории $\mathbf{r}_e = \mathbf{r}_e(t)$ мобильного робота от спланированной $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$

Fig.3. Deviation of the real trajectory $\mathbf{r}_e = \mathbf{r}_e(t)$ of the mobile robot from the planned trajectory $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$

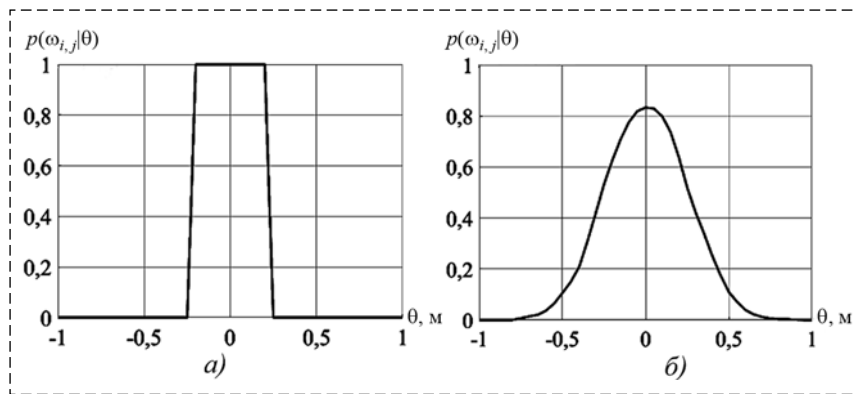


Рис. 4. Координатный закон накрытия МР ячеек, расположенных на удалении θ от траектории:

a — ошибка по углу и боковому отклонению в системе управления отсутствует; b — ошибки системы управления по углу и боковому отклонению распределены по нормальному закону

Fig.4. Coordinate law of coverage of cells located at a distance θ from the trajectory by a mobile robot:

a — there are no control system's errors in the angle and lateral deviation; b — there are control system's error in angle and lateral deviation with normal distribution

натного закона $p(\omega_{ij} | \theta)$ для МР, полученные с помощью имитационного моделирования методом Монте-Карло с учетом характеристик системы управления движением и его габаритных размеров, приведены на рис. 4.

Зная условную вероятность $p(\omega_{ij} | \theta)$, можно определить область A_r , в которой вероятность столкновения МР с препятствием будет отлична от нуля. Будем считать аварийной ситуацией в момент времени t столкновение с препятствием k , занимающим подмножество $O_k \subset \Omega_h$ [13]:

$$O_k \cap A_r \neq \emptyset, \forall t \in [0, T]. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом выражения (5) и условия (6) вероятность столкновения МР с препятствием в момент времени t при горизонте прогноза движения δ будет равна

$$P(\tau \leq t \leq \tau + \delta) = \max_{A_r} (p(\omega_{ij} | \theta) p(t, \omega_{ij})). \quad (7)$$

Значение вероятности по формуле (7) необходимо вычислять в каждый момент времени движения робота $t \in [0, T]$ в целях учета новой информации об окружающей среде, в том числе появления динамических препятствий в зоне действия робота.

Экспериментальная проверка модели оценки вероятности столкновения мобильного робота с препятствием

Представленный выше метод определения вероятности столкновения МР с препятствием

(4)–(7) был реализован в виде программного модуля в среде ROS (Robot Operating System) и применен в системе управления движением мобильного робота "Пластун". Для проверки адекватности модели вычисления вероятности столкновения робота с препятствием была проведена серия натурных экспериментов с данным мобильным роботом (рис. 5, см. третью сторону обложки), оснащенным одним сканирующим 2D-дальномером. В рамках экспериментов была смоделирована ситуация появления на траектории движения МР препятствия с возможностью его объезда (рис. 5, б, см.

третью сторону обложки).

Задавалась целевая точка, в которую МР необходимо было выполнить перемещение. После планирования опорной траектории робот начинал движение. После возникновения на пути робота препятствия (рис. 6, а) "Модуль безопасности" сообщал о возможном столкновении в блок "Управление автодвижением", который отменял движение по текущей траектории и запускал построение новой траектории в блоке "Планирование траектории" (рис. 6, б), после построения которой МР совершал объезд препятствия (рис. 6, в, г).

На графике изменения вероятности столкновения (рис. 6, д) между точками 1 и 2 вероятность столкновения резко возрастала после появления препятствия на пути следования МР. Далее вероятность уменьшалась до нуля (точка 3), так как происходила отмена текущей "опасной" траектории и выполнялось планирование новой. После точки 4 вероятность находилась в пределах от 0,6 до 0,7 из-за уменьшения пространства для совершения объезда препятствия и планирования траектории в ограниченном пространстве между препятствием и стенкой коридора.

Во время выполнения данного эксперимента после завершения объезда препятствия по коридору навстречу роботу незапланированно двигался человек (динамическое препятствие), который обогнул робота. В момент сближения робота и человека вероятность столкновения увеличилась, что и иллюстрирует пик между точками 5 и 6 (рис. 6, д).

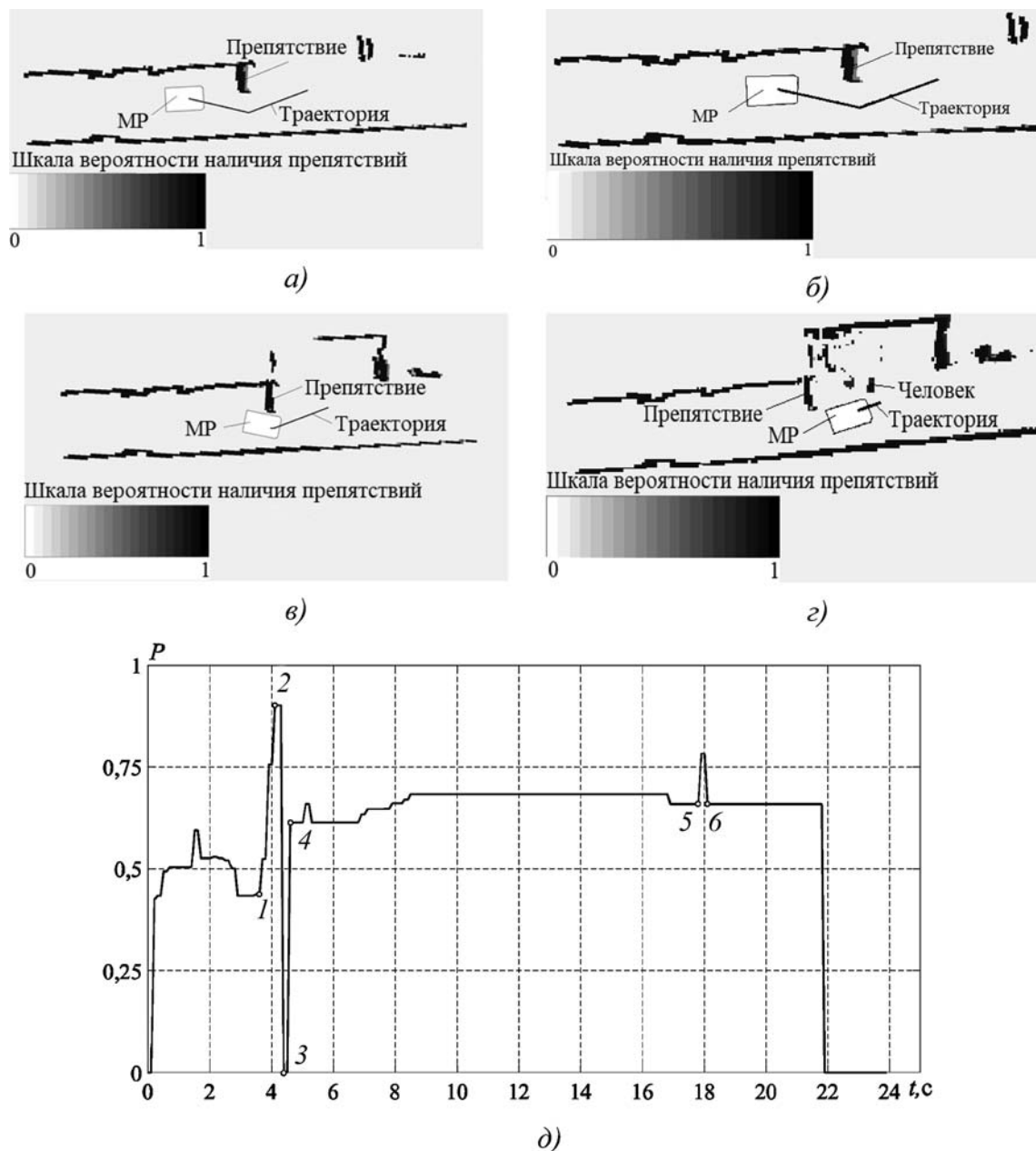


Рис. 6. Обезд препятствия мобильным роботом:

a — обнаружение препятствия на траектории; *б* — построение траектории для объезда; *в* — объезд препятствия; *г* — остановка МР; *д* — график изменения вероятности его столкновения с препятствием

Fig. 6. Obstacle avoiding of the mobile robot:

a — detecting an obstacle on the trajectory; *б* — planning the trajectory for avoiding obstacle; *в* — avoiding an obstacle; *г* — stopping the mobile robot; *д* — the plot of probability collision with an obstacle

Заклучение

Представленный в работе метод оценки вероятности столкновения с препятствием движущегося по спланированной траектории автономного МР в отличие от известных базируется не только на результатах анализа расположения и поведения объектов во внешней среде, но и на использовании статистических характеристик системы управления движением. Такой подход

при дискретном представлении (в виде клеток) области возможных перемещений МР относительно спланированной траектории позволяет для каждой клетки этой области рассматривать оценку вероятности столкновения как произведение вероятности нахождения препятствия в этой клетке и условной вероятности накрытия МР этой клетки. Это не требует привлечения дополнительной априорной информации о возможных перемещениях препятствий, что

в методическом и вычислительном плане существенно упрощает задачу.

Особенностью представленного метода является также применение многослойной карты проходимости, которая позволяет снизить число ошибочных классификаций о препятствиях за счет комплексирования результатов работы отдельных классификаторов [22] в результирующий слой с помощью байесовского вывода.

В целом вычисление вероятности столкновения автономного мобильного робота с препятствием позволяет перейти к количественной оценке безопасности его движения с учетом анализа возможного наносимого ущерба и, как следствие, к риск-ориентированному управлению движением робота, которое рассматривается как дальнейшее направление работы авторов.

Список литературы

1. Liu S. B. et al. Provably Safe Motion of mobile robots in human environments // International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2017). 2017. P. 1351-1357. DOI: 10.1109/IROS.2017.8202313.
2. Adam S., Larsen M., Jensen K., Schultz U. P. Rule-based dynamic safety monitoring for mobile robots // Journal of software Engineering. 2016. Vol. 7. P. 120—141.
3. Hafez O. A., Arana G. D., Spenko M. Integrity risk-based model predictive control for mobile robots // 2019 International conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, Canada, 2019. P. 5793—5799. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793521.
4. Gill J.S., Pisu P., Krovi V. N., Schmid M. J. Behavior identification and prediction for a probabilistic risk framework // arXiv:1905.08332v1, 2019, 10 p. DOI: 10.1115/DSCC2019-9097.
5. Blake A. et al. FPR — Fast path risk algorithm to evaluate collision probability // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020. Vol. 5, N. 1. P. 1—7. DOI: 10.1109/LRA.2019.2943074.
6. Gindele T., Brechtel S., Dillmann R. A probabilistic model for estimating driver behaviors and vehicle trajectories in traffic environments // 13th International IEEE Conference on, IEEE. 2010. P. 1625—1631. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625262.
7. Xiangkun He, Yulong Liu, Chen Lv, Xuewu Ji, Yahui Liu. Emergency steering control of autonomous vehicle for collision avoidance and stabilization // Vehicle System Dynamics. 2019. Vol. 57, Iss. 8. P. 1163—1187. DOI: 10.1080/00423114.2018.1537494.
8. Puphal T., Probst M., Eggert J. Probabilistic Uncertainty-Aware Risk Spot Detector for Naturalistic Driving // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2019. Vol. 4, N. 3. P. 406—415. DOI: 10.1109/TIV.2019.2919465.
9. Miura J., Negishi Y., Shirai Y. Adaptive robot speed control by considering map and motion uncertainty // Robotics and Autonomous Systems. 2006. Vol. 54. P. 110—117. DOI: 10.1016/j.robot.2005.09.020.
10. Agamennoni G., Nieto J. I., Nebot E. M. Estimation of multivehicle dynamics by considering contextual information // IEEE Transactions on robotics. August 2012. Vol. 28, N. 4. DOI: 10.1109/TRO.2012.2195829.
11. Яковлев Д.С., Тачков А. А. Задача оценки и обеспечения безопасности наземных робототехнических комплексов // Сб. Тр. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. "Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем". 2019. С. 409—413.
12. Северцев Н. А., Дедков В. К. Системный анализ и моделирование безопасности. М.: Высшая школа, 2006. 462 с.
13. Rios-Martinez J., Spalanzani A., Laugier C. Understanding human interaction for probabilistic autonomous navigation using Risk-RRT approach // IEEE Int. Conf. IROS. 2011. P. 2014—2019. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094496.
14. Fulgenzi C., Spalanzani A., Laugier C. Dynamic obstacle avoidance in uncertain environment combining PVOs and occupancy grid // Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma. 2007. P. 1610—1616. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363554.
15. Кузнецов А. В. Модели движения, взаимодействия и сети связи мобильных агентов в иерархических системах на основе клеточных автоматов. Дисс. доктора физ.-мат. наук, 05.13.01, место защиты г. Воронеж, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет", 2019. 268 с.
16. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation // Computer. June 1989. Vol. 22. P. 46—57. DOI: 10.1109/2.30720.
17. Freda L. et al. 3D Multi-robot patrolling with two-level coordination strategy // Autonomous Robots. 2019. Vol. 43. P. 1747—1779. DOI: 10.1007/s10514-018-09822-3.
18. Lu D. V., Hershberger D., Smart W. D. Layered costmaps for context-sensitive navigation // IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2014. P. 709—715. DOI: 10.1109/IROS.2014.6942636.
19. Fankhauser P., Hutter M. A Universal Grid Map Library: Implementation and Use Case for Rough Terrain Navigation // Robot Operating System (ROS), Springer, Cham. 2016. Vol. 1. P. 99—120. DOI: 10.1007/978-3-319-26054-9_5.
20. Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox. Probabilistic Robotics. MIT press, 2006. P. 26—33.
21. Буравлев А. И. К вопросу определения приведенной зоны поражения объектов // Вооружение и экономика. 2018. № 2(44). С. 11—16.
22. Тачков А. А., Вуколов А. Ю., Козов А. В. Особенности портирования Robot Operating System на программно-аппаратную платформу "Эльбрус" // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32, № 4. С. 655—664. DOI: 10.15827/0236-235X.128.655-664.

Probability of Collision between Autonomous Mobile Robot with an Obstacle

D. S. Iakovlev, yakovlevds@bmstu.ru, A. A. Tachkov, tachkov@bmstu.ru,
Science and Educational Center "Robotics" Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Iakovlev D. S., Engineer of the Department "Automated transport systems", Science and Educational Center "Robotics" Bauman Moscow State Technical University, Post-graduate of "Theory of Mechanisms and Machines" department of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: yakovlevds@bmstu.ru

Accepted on December 03, 2020

Abstract

The probability estimation problem of a collision between path tracking for an autonomous mobile robot with an obstacle is considered. We reviewed and analyzed methods for solving this problem. We show that reviewed methods use periodically updated grid maps (occupancy grids). The new method of probability estimation of the collision between the mobile robot with an obstacle is presented. This method based on the use of probabilistic grid map. Each cell of this map stores the estimated probability that the obstacle is located within. In addition, this map stores the conditional probability of occupying of the map cells by a robot, taking into account the possible lateral and angular deviation from the planned trajectory. This deviation caused by error connected with dynamic characteristics of the tracking system. To build the probabilistic occupancy grid, the dynamically updated multilayer grid map was used. Each layer of this map, except for the resulting output, has been filled with the data obtained from classifiers which process information incoming from sensory of the robot. This layer is the result of Bayesian inference from the layers laying below. The motion control system provides construction of the multilayered grid maps, probabilistic occupancy grids, coordinate estimations, path planning, motion tracking and the probability estimation for collision with obstacles. The method such estimation is implemented as an embedded module compatible with ROS (Robot Operating System). The description of experiments with the mobile robot in-nature (on the field) is given in the case when a motile obstacle appears intercepting the planned path. The estimated changes of probability for a collision between the mobile robot with obstacle are presented, interpretation of the obtained results is also given. Here we demonstrated the necessity of collision probability estimation for assessment of the risk as the main safety indicator of the given motion control system. Results of this work are considered and evaluated as a solution to the problem of ensuring the safety of motion tracking for autonomous mobile robots.

Keywords: autonomy, traffic safety, probability of collision with an obstacle, security, mobile robot, traffic control system, risk, emergency

For citation:

Iakovlev D. S., Tachkov A. A. Probability of Collision between Autonomous Mobile Robot with an Obstacle, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 125—133.

DOI: 10.17587/mau.22.125-133

References

1. Liu S. B. et al. Provably Safe Motion of mobile robots in human environments, *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-2017)*, 2017, pp. 1351—1357, DOI: 10.1109/IROS.2017.8202313.
2. Adam S., Larsen M., Jensen K., Schultz U. P. Rule-based dynamic safety monitoring for mobile robots, *Journal of software Engineering*, 2016, vol. 7, pp. 120—141.
3. Hafez O. A., Arana G. D., Spenko M. Integrity risk-based model predictive control for mobile robots, *2019 International conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, Canada, 2019, pp. 5793—5799, DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793521.
4. Gill J.S., Pisu P., Krovı V. N., Schmid M. J. Behavior identification and prediction for a probabilistic risk framework, arXiv:1905.08332v1, 2019, 10 p. DOI: 10.1115/DSCC2019-9097.
5. Blake A. et al. FPR — Fast path risk algorithm to evaluate collision probability, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 1—7, DOI: 10.1109/LRA.2019.2943074.
6. Gindele T., Brechtel S., Dillmann R. A probabilistic model for estimating driver behaviors and vehicle trajectories in traffic environments, *13th International IEEE Conference on, IEEE*, 2010, pp. 1625—1631, DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625262
7. Xiangkun He, Yulong Liu, Chen Lv, Xuewu Ji, Yahui Liu. Emergency steering control of autonomous vehicle for collision avoidance and stabilization, *Vehicle System Dynamics*, 2019, vol. 57, iss. 8, pp. 1163—1187, DOI: 10.1080/00423114.2018.1537494.
8. Puphal T., Probst M., Eggert J. Probabilistic Uncertainty-Aware Risk Spot Detector for Naturalistic Driving, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2019, vol. 4, no. 3, pp. 406—415, DOI: 10.1109/TIV.2019.2919465.
9. Miura J., Negishi Y., Shirai Y. Adaptive robot speed control by considering map and motion uncertainty, *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, vol. 54, pp. 110—117, DOI: 10.1016/j.robot.2005.09.020.
10. Agamenonni G., Nieto J. I., Nebot E. M. Estimation of multivehicle dynamics by considering contextual information, *IEEE Transactions on robotics*, August 2012, vol. 28, no. 4, DOI: 10.1109/TRO.2012.2195829.
11. Iakovlev D. S., Tachkov A. A. The task of assessing and ensuring the safety of ground-based robotic systems, *Sbornik trudov 3-oj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Fundamental'no-prikladnye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadyozhnosti, ustojchivosti i effektivnosti sistem"*, pp. 409—413 (in Russian).
12. Severtsev N. A., Dedkov V. K. System analysis and safety modeling, Moscow, Vysshaya shkola, 2006, 462 pp. (in Russian).
13. Rios-Martinez J., Spalanzani A. and Laugier C. Understanding human interaction for probabilistic autonomous navigation using Risk-RRT approach, *IEEE Int. Conf. IROS*, 2011, pp. 2014—2019, DOI: 10.1109/IROS.2011.6094496.
14. Fulgenzi C., Spalanzani A., Laugier C. Dynamic obstacle avoidance in uncertain environment combining PVOs and occupancy grid, *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, 2007, pp. 1610—1616, DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363554.
15. Kuznetsov A. V. Models of movement, interaction and communication networks of mobile agents in hierarchical systems based on cellular automata, Doctor thesis in Physical and Mathematical Sciences, Voronezh State University, 2019, 268 p. (in Russian).
16. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation, *Computer*, June 1989, vol. 22, pp. 46—57.
17. Freda L. et al. 3D Multi-robot patrolling with two-level coordination strategy, *Autonomous Robots*, 2019, vol. 43, pp. 1747—1779, DOI: 10.1007/s10514-018-09822-3.
18. Lu D. V., Hershberger D., Smart W. D. Layered costmaps for context-sensitive navigation, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2014, pp. 709—715, DOI: 10.1109/IROS.2014.6942636.
19. Fankhauser P., Hutter M. A Universal Grid Map Library: Implementation and Use Case for Rough Terrain Navigation, *Robot Operating System (ROS)*, Springer, Cham, 2016, vol. 1, pp. 99—120, DOI: 10.1007/978-3-319-26054-9_5.
20. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics, MIT press, 2006, pp. 26—33.
21. Buravlev A. I. To the question of determining the reduced damage zone of objects, *Vooruzhenie i ekonomika*, 2018, vol. 2 (44), pp. 11—16.
22. Tachkov A. A., Vukolov A. Yu., Kozov A. V. Peculiarities of porting the Robot Operating System Framework onto Elbrus platform, *Programmnye produkty i sistemy*, 2019, vol. 32, no. 4, pp. 655—664. DOI: 10.15827 / 0236-235X.128.655-664 (in Russian).

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, проф., filaret@iacp.dvo.ru,

Д. А. Юхимец, д-р техн. наук, доц., undim@iacp.dvo.ru,

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Двухконтурная система с эталонной моделью для управления пространственным движением грузового необитаемого подводного аппарата¹

В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) все активнее используются для решения задач, связанных с обслуживанием подводных коммуникаций и различных подводных производственных комплексов, а также при выполнении подводных технологических операций. Для эффективного выполнения указанных операций АНПА должны иметь высококачественные системы управления, которые обеспечат их точное движение как по протяженным пространственным траекториям, формируемым в процессе их передвижения к объектам работ, так и при выполнении сложных маневров вблизи объектов подводной инфраструктуры. При этом основной сложностью, возникающей в процессе синтеза систем управления АНПА, является существенная нелинейность указанных объектов управления, наличие перекрестных связей между их степенями свободы, а также неопределенность и переменность их параметров. В работе предложен метод синтеза системы управления пространственным движением АНПА, позволяющей учесть указанные негативные эффекты. Эта система имеет два контура. Первый включает в себя комбинированную систему, содержащую нелинейный регулятор для достижения желаемых динамических характеристик АНПА, когда его параметры равны номинальным значениям, и регулятор с самонастройкой по эталонной модели, обеспечивающей компенсацию неопределенной или переменной части параметров. При этом параметры регулятора с эталонной моделью выбираются так, чтобы уменьшить возможную амплитуду разрывного сигнала управления скоростью движения АНПА. Вторым контуром представляет собой нелинейный регулятор положения, позволяющий учесть динамические свойства контура управления скоростью и кинематические свойства АНПА. Преимуществом предложенной системы управления по сравнению с традиционными, построенными на основе ПИД регуляторов, является более высокая точность управления при движении по сложным пространственным траекториям независимо от изменения параметров АНПА. Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность синтезированной двухконтурной системы управления.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, система управления, нелинейное управление, самонастройка, эталонная модель, параметрическая неопределенность

Введение

В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) кроме традиционных задач картографирования, поиска и мониторинга подводной среды все активнее используются для решения задач, связанных с обслуживанием подводных коммуникаций и различных подводных производственных комплексов [1, 2], а также с выполнением подводных технологических операций. Особенностью указанных операций является существенная переменность и неопределенность параметров АНПА, которая возникает в том числе и при транспортировке грузов с заранее неизвестной массой и габаритными размерами, а также при выполнении работ с использованием различных рабочих инструментов.

Для эффективного выполнения технологических и транспортных операций АНПА должны иметь высококачественные системы

управления, которые обеспечат их точное движение как по протяженным пространственным траекториям, формируемым в процессе их передвижения к объектам работ (в том числе в составе группы), так и при выполнении сложных маневров вблизи объектов подводной инфраструктуры с изменением всех линейных и угловых координат для точного перемещения вблизи различных подводных объектов. При этом основной сложностью, возникающей в процессе синтеза систем управления АНПА, является существенная нелинейность указанных систем, наличие перекрестных связей между их степенями свободы, а также неопределенность и переменность их параметров.

Решению проблемы синтеза систем управления АНПА посвящено большое число работ, содержащих различные методы. Эти методы могут использовать упрощенные или линеаризованные математические модели динамики АНПА, описывающие их движения по отдельным степеням свободы, [3, 4] и позволяют обеспечивать достаточно эффективное управление

¹Работа поддержана РФФИ (грант 19-08-00347).

АНПА по отдельным степеням свободы при их движениях по протяженным траекториям, расположенным в вертикальной или горизонтальной плоскостях. Недостатком подобных систем управления, отмечаемым многими исследователями [5, 6], является существенное ухудшение показателей качества их управления при изменении скоростей движения АНПА в процессе перемещения по пространственным траекториям с одновременным изменением нескольких линейных и угловых координат или параметров АНПА. Это обусловлено наличием перекрестных связей между степенями свободы, а также нелинейными характеристиками АНПА, которые не позволяют обеспечить с помощью типовых линейных регуляторов быструю компенсацию этих негативных эффектов.

Для устранения указанных недостатков используются более сложные нелинейные, адаптивные и робастные системы управления, построенные на основе нейронных сетей и нечеткой логики [7, 8]. Достоинством таких систем является то, что для их синтеза не требуются знания о параметрах АНПА, однако обычно они имеют сложную практическую реализацию. Кроме того, их анализ с помощью известных методов теории автоматического управления значительно затруднен, что не позволяет гарантировать их работоспособность во всех возможных режимах работы АНПА.

Другой подход предполагает создание адаптивных систем управления [9, 10], позволяющих подстраивать их параметры в зависимости от изменения параметров АНПА и внешних воздействий. Но эти адаптивные системы обычно имеют сложную реализацию, которая предполагает использование алгоритмов идентификации неизвестных параметров АНПА и внешних воздействий в реальном масштабе времени, что часто невозможно реализовать на бортовом вычислительном оборудовании с типовым набором бортовых датчиков.

Одними из наиболее эффективных типов систем управления сложными нелинейными динамическими объектами с неизвестными или переменными параметрами являются системы с разрывным управлением, к которым относятся системы с переменной структурой [11, 12] и самонастройкой по эталонной модели [13, 14]. Системы этого типа часто используются для высокоточного управления пространственным движением АНПА различных типов. В работах [15, 16] предложен подход к синтезу децентра-

лизованных систем управления пространственными движениями АНПА, в которых используются шесть отдельных каналов управления для каждой степени свободы с использованием адаптивных систем с переменной структурой. Недостатком этих систем является невозможность компенсации ими быстроменяющихся взаимовлияний между каналами управления, которые возникают при движении АНПА с высокими скоростями. В работе [13] предложена система централизованного управления, основанная на самонастройке по эталонной модели, которая позволяет формировать сигналы управления, компенсирующие быстро изменяющиеся параметры АНПА и взаимовлияния каналов управления.

Однако недостатком этих систем является большая амплитуда разрывных сигналов управления, которая негативно воздействует на механические части движителей АНПА. Кроме того, в таких системах сигнал управления формируется в виде сил и моментов, развиваемых движительным комплексом по различным степеням свободы. Но модель движителей АНПА может быть составлена только приближенно, что может привести к формированию некорректных управляющих воздействий, а в результате — к снижению качества управления. Кроме того, при синтезе систем управления массоинерционные, гидростатические и гидродинамические параметры АНПА (его масса, моменты инерции, присоединенные массы жидкости, вязкие трения и др.) считаются постоянными. Но для грузовых АНПА эти параметры существенно меняются, что приводит к значительному ухудшению качества управления.

Для устранения указанных недостатков, возникающих в процессе реализации разрывных законов управления, необходимо снижать амплитуду разрывного сигнала, не уменьшая робастные свойства системы управления, а также учитывать возможные неопределенности в модели движителей АНПА. Для этого целесообразно использовать комбинированные системы управления [16, 17], где основной сигнал управления будет формироваться непрерывным нелинейным регулятором, а неопределенность или переменность параметров АНПА будет компенсироваться с помощью разрывного сигнала управления. При этом выбор параметров закона формирования дополнительного разрывного сигнала управления должен обеспечивать его минимальную амплитуду.

Описание объекта управления и постановка задачи

В работе исследуется АНПА, описываемый матричными уравнениями [18]:

$$M\dot{v} + (C(M, v) + D(d_1, d_2, v))v + g(\eta) = \tau, \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v,$$

где $M = M_R + M_A \in R^{6 \times 6}$; M_R — матрица инерции; M_A — матрица присоединенных масс и моментов инерции жидкости; $C(M, v) \in R^{6 \times 6}$ — матрица кориолисовых и центробежных сил и моментов; $D(d_1, d_2, v) \in R^{6 \times 6}$ — матрица гидродинамических сил и моментов; $g(\eta) \in R^6$ — вектор гидростатических сил и моментов; $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ — вектор положения и ориентации АНПА в абсолютной системе координат (СК); $\tau = [\tau_x, \tau_y, \tau_z, M_x, M_y, M_z]^T$ — вектор сил тяг и моментов, развиваемых движителем комплексом АНПА в связанной СК; $v = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ — вектор линейных и угловых скоростей в связанной СК.

В системе (1) динамика движителей не учитывается, так как постоянные времени самого АНПА намного больше постоянных времени его движителей. При этом полагается, что движительный комплекс может создавать силы тяги и моменты по всем степеням свободы АНПА. Это необходимо для выполнения точных маневров вблизи объектов работ.

Матрица кориолисовых и центробежных сил и моментов, входящая в уравнения (1), описывается выражениями [18]

$$C(M, v) = C_{RB}(M_R, v) + C_A(M_A, v), \quad (2)$$

где

$$C_{RB}(M_R, v) =$$

$$= \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) \\ -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) & -S(M_{21}v_1 + M_{22}v_2) \end{bmatrix},$$

$$M_R = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix},$$

$$C_A(M_A, v) =$$

$$= \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) \\ -S(A_{11}v_1 + A_{12}v_2) & -S(A_{21}v_1 + A_{22}v_2) \end{bmatrix},$$

$$M_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

$$v_1 = [v_x \ v_y \ v_z]^T; v_2 = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T,$$

а оператор $S(\cdot)$ имеет вид

$$S(\lambda) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix}, \lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T.$$

Элементы диагональной матрицы $D(d_1, d_2, v)$ в (1) описываются суммой [18]

$$D_{ii} = d_{1i} + d_{2i}|v_i|, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (3)$$

где $d_{1i}, d_{2i}, i = \overline{1, 6}$, — гидродинамические коэффициенты, определяющие квадратичную и линейную зависимости сил и моментов гидродинамического сопротивления от скоростей движения АНПА по всем его степеням свободы.

Вектор гидростатических сил и моментов имеет вид [18]

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin\theta \\ -(W - B)\cos\theta\sin\varphi \\ -(W - B)\cos\theta\cos\varphi \\ -B_y\cos\theta\cos\varphi + B_z\cos\theta\sin\varphi \\ B_z\sin\theta + B_x\cos\theta\cos\varphi \\ -B_x\cos\theta\sin\varphi - B_y\sin\theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где W — сила тяжести; B — Архимедова сила; $B_x = Wx_G - Bx_B$, $B_y = Wy_G - By_B$, $B_z = Wz_G - Bz_B$; x_G, y_G, z_G и x_B, y_B, z_B — соответственно, координаты центров тяжести и плавучести АНПА в связанной СК.

Параметры АНПА и движительного комплекса точно не известны и могут меняться при транспортировке заранее неизвестного груза. Поэтому, учитывая, что параметры M, d_1 и d_2 в уравнения (1)—(3) входят линейно, динамику движения АНПА можно описать в виде

$$(M_n + M_\Delta)\dot{v} + (C_n(M_n, v) + C_\Delta(M_\Delta, v))v +$$

$$+ (D_n(d_{n1}, d_{n2}, v) + D_\Delta(d_{\Delta 1}, d_{\Delta 2}, v))v +$$

$$+ g_n(\eta) + g_\Delta(\eta) = \tau_n + \tau_\Delta, \quad (5)$$

где $C_n \in R^{6 \times 6}$, $D_n \in R^{6 \times 6}$, $g_n \in R^6$ — силы и моменты, возникающие при движении АНПА и зависящие от номинальных значений параметров АНПА; $C_\Delta \in R^{6 \times 6}$, $D_\Delta \in R^{6 \times 6}$, $g_\Delta \in R^6$ — дополнительные силы и моменты, зависящие от неопределенной или изменяющейся части значений параметров АНПА; $M_n \in R^{6 \times 6}$, $d_{n1} \in R^6$, $d_{n2} \in R^6$ — номинальные значения параметров АНПА; $M_\Delta \in R^{6 \times 6}$, $d_{\Delta 1} \in R^6$, $d_{\Delta 2} \in R^6$ — неопределенные или изменяющиеся части параметров АНПА; $\tau_n \in R^6$ — вектор сил тяг и

моментов, формируемых двигателями АНПА с учетом их номинальных параметров; $\tau_{\Delta} \in R^6$ — дополнительный вектор сил тяг и моментов, зависящий от неопределенных параметров двигателей АНПА. Матрицы C_{Δ} и D_{Δ} вычисляются по выражениям (2), (3) при использовании M_{Δ} , $d_{\Delta 1}$ и $d_{\Delta 2}$, соответственно.

Для элементов матриц M_{Δ} , C_{Δ} и векторов $d_{\Delta 1}$, $d_{\Delta 2}$, g_{Δ} , τ_{Δ} выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} M &= M_n + M_{\Delta} > 0, \\ |m_{\Delta,ij}| &\leq \bar{m}_{\Delta,ij}, m_{n,ij} + m_{\Delta,ij} > 0, |c_{\Delta,ij}| \leq \bar{c}_{\Delta,ij}, \\ |d_{\Delta 1,j}| &\leq \bar{d}_{\Delta 1,j}, d_{n1,j} + d_{\Delta 1,j} > 0, \\ |d_{\Delta 2,j}| &\leq \bar{d}_{\Delta 2,j}, d_{n2,j} + d_{\Delta 2,j} > 0, \\ |g_{\Delta,i}| &\leq \bar{g}_{\Delta,i}, |\tau_{\Delta,i}| \leq \bar{\tau}_{\Delta,i}, i = \overline{1,6}, j = \overline{1,6}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\bar{m}_{ij}$, $\bar{d}_{\Delta 1j}$, $\bar{d}_{\Delta 2j}$, $\bar{c}_{\Delta ij}$, $\bar{g}_{\Delta i}$, $\bar{\tau}_{\Delta i}$ — оценки максимальных отклонений соответствующих параметров АНПА, элементов матриц кориолисовых и гидродинамических сил и моментов, гидростатических сил и моментов, а также сил тяг и моментов, развиваемых двигателями, от их номинальных значений.

Для точного выполнения подводных операций и маневрирования вблизи подводных объектов движение АНПА всегда должно происходить с заданными показателями качества независимо от возможного изменения их параметров. С помощью типовых линейных систем управления этого достичь не удастся. Поэтому в работе ставится задача разработки нового подхода к синтезу системы управления пространственным движением АНПА, обеспечивающей заданное качество управления при любом изменении параметров АНПА и их двигателей в указанных диапазонах (6). Для поддержания требуемой точности работы указанной системы будет использована самонастройка по эталонной модели с уменьшенной амплитудой разрывных сигналов, обеспечивающих снижение влияния неопределенных и переменных параметров АНПА на точность их работы. Невысокая сложность создаваемой системы позволит обеспечить ее практическую реализацию на бортовом компьютере аппарата.

Синтез самонастраивающейся системы управления АНПА

Для решения поставленной задачи будет использован подход, описанный в работах [13–15]. Этот подход предполагает создание си-

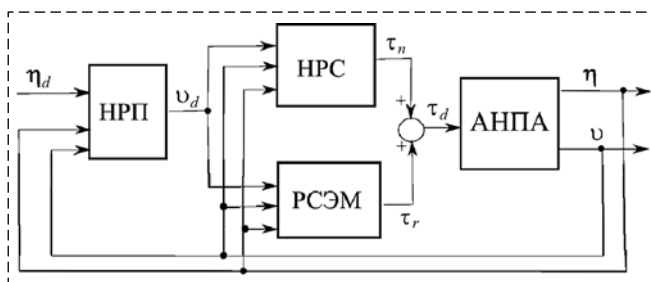


Рис. 1. Обобщенная схема системы управления АНПА:

НРП — нелинейный регулятор положения, НРС — нелинейный регулятор скорости, РСЭМ — регулятор с самонастройкой по эталонной модели

Fig. 1. Diagram of AUV control system:

НРП (NCP) — nonlinear position controller, НРС (NSC) — nonlinear velocity controller, РСЭМ (CSRM) — self-tuning controller with reference model

стемы управления, содержащей контур управления скоростью и контур управления положением АНПА (рис. 1).

Система внутреннего контура управления скоростью движения АНПА обеспечивает развязку каналов управления всеми его степенями свободы, компенсацию неопределенных и переменных параметров аппарата и придание ему желаемых динамических свойств. Внешний контур положения обеспечивает независимое управление линейными и угловыми координатами АНПА по всем его степеням свободы. Это разделение системы управления на два контура позволяет упростить учет динамических свойств АНПА и использовать только первое уравнение системы (1) в отличие от одноконтурной системы, в которой необходимо одновременно учитывать динамические и кинематические свойства аппарата.

В свою очередь, контур управления скоростью состоит из нелинейного регулятора скорости (НРС), обеспечивающего желаемые динамические свойства АНПА, когда их параметры имеют номинальные значения, и дополнительного регулятора скорости с эталонной моделью (РСЭМ), компенсирующего неопределенные или изменяющиеся параметра аппарата. Ниже детально рассмотрена процедура синтеза каждого из указанных контуров управления.

2.1. Синтез контура управления скоростью движения АНПА

Сигнал управления скоростью движения АНПА формируется из двух независимых сигналов:

$$\tau_d = \tau_n + \tau_r. \quad (7)$$

Главная его часть $\tau_n \in R^6$ — сигнал на выходе нелинейного регулятора, обеспечивающий АНПА желаемые динамические характеристики при номинальных значениях его параметров, а вспомогательная $\tau_r \in R^6$ — дополнительный сигнал управления, компенсирующий возможные отклонения параметров АНПА от заданных номинальных значений. Такое разделение позволяет формировать главную часть в виде непрерывного сигнала, а дополнительную — в виде разрывного сигнала с уменьшенной амплитудой.

При формировании сигнала τ_n используется метод линеаризации обратной связью [17, 19]. Этот сигнал можно описать в виде

$$\begin{aligned} \tau_n = & M_n \alpha + C_n(M_n, v) v + \\ & + D_n(d_{n1}, d_{n2}, v) v + g_n(\eta), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\alpha = \dot{v}_d - \Lambda e, e = v - v_d,$$

где $v_d \in R^6$ — желаемое значение вектора скорости движения АНПА в связанной СК; $\Lambda \in R^{6 \times 6}$ — диагональная матрица положительных коэффициентов.

После подстановки выражения (8) в уравнение (1) при номинальных значениях параметров АНПА получается уравнение, которым будет описываться динамика АНПА с учетом сигнала τ_n :

$$M_n(\dot{e} + \Lambda e) = 0. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), использование закона управления (8) позволяет обеспечить развязку каналов управления АНПА и придать им требуемые динамические свойства, описываемые дифференциальными уравнениями с постоянными желаемыми коэффициентами, задаваемые элементами матрицы Λ , в случае, когда параметры АНПА являются номинальными.

Компенсация неопределенных или переменных параметров АНПА обеспечивается с помощью разрывного сигнала управления, формирующегося на основе системы с эталонной моделью [13, 14]. Для синтеза этой системы сначала зададим эталонную модель, которая будет описывать желаемые динамические свойства АНПА. Указанная модель формируется на основе выражения (9) и имеет следующий вид:

$$\dot{v}_m + \Lambda v_m = \dot{v}_d + \Lambda v_d, \quad (10)$$

где $v_m \in R^6$ — выходной сигнал эталонной модели.

Дополнительный сигнал управления на основе эталонной модели будет формироваться в виде [13, 14]

$$\tau_r = h \operatorname{sign}(e_m), \quad (11)$$

где $e_m = v_m - v$; $h \in R^{6 \times 6}$ — диагональная матрица коэффициентов.

Для определения значений элементов матрицы h [18] зададим функцию Ляпунова $V = \frac{1}{2} e_m^T M e_m$, где $M \in R^{6 \times 6}$ — положительно определенная матрица.

Производная функции Ляпунова равна

$$\dot{V} = e_m^T M \dot{e}_m. \quad (12)$$

С учетом равенства $\dot{e}_m = \dot{v}_m - \dot{v}$ выражение (12) можно переписать в виде

$$\dot{V} = e_m^T (M \dot{v}_m - M \dot{v}). \quad (13)$$

С учетом выражений (5), (7) и (8) выражение (13) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e_m^T (M \dot{v}_m + ((C_n(M_n, v) + C_\Delta(M_\Delta v))) v + \\ & + (D_n(d_{n1}, d_{n2}, v) + D_\Delta(d_{\Delta 1}, d_{\Delta 2}, v)) v + \\ & + g_n(\eta) + g_\Delta(\eta) - M_n \alpha - C_n(M_n, v) v - \\ & - D_n(d_{n1}, d_{n2}, v) v - g_n(\eta) - \tau_\Delta - \tau_r). \end{aligned} \quad (14)$$

Приведя в выражении (14) подобные члены, с учетом (11) получим

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e_m^T (M_\Delta \dot{v}_m + M_n(\dot{v}_m - \alpha) + \\ & + (C_\Delta(M_\Delta v) + D_\Delta(d_{\Delta 1}, d_{\Delta 2}, v)) v + \\ & + g_\Delta(\eta) - \tau_\Delta - h \operatorname{sign}(e_m)). \end{aligned} \quad (15)$$

Для выполнения условия $e_m \rightarrow 0$ необходимо, чтобы $\dot{V}$ была отрицательно определенной. Для этого требуется, чтобы в выражении (15) элементы матрицы h выбирались с учетом неравенств

$$h_{ii} > \max |H_i|, i = \overline{1, 6}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} H = & M_\Delta \dot{v}_m + M_n(\dot{v}_m - \alpha) + \\ & + (C_\Delta(v) + D_\Delta(v)) v + g_\Delta(\eta) - \tau_\Delta. \end{aligned}$$

Однако использование неравенств (16) потребует введения разрывных сигналов с максимально возможной амплитудой. А это приведет к большим затратам энергии и негативно скажется на механических частях движителей

при использовании закона управления (7), (11) в бортовых системах АНПА.

Для уменьшения амплитуды разрывной сигнал следует формировать с учетом текущей величины v :

$$\begin{aligned} h_{ii} &= H_{v,i}, i = \overline{1,6}; \\ H_v &= V_{dm} + M_n(\dot{v}_m - \alpha) + C_{\Delta}^{pm} + \\ &+ D_{\Delta}^p + g_{\Delta}^{\max}(\eta) + k_{\tau}\tau_{np}; \\ V_{dm} &= M_{\Delta}^{\max}v_m^p, \\ v_m^p &= (|\dot{v}_{mx}|, |\dot{v}_{my}|, |\dot{v}_{mz}|, |\dot{\omega}_{mx}|, |\dot{\omega}_{my}|, |\dot{\omega}_{mz}|)^T; \\ C_{\Delta,ij}^{pm} &= |C_{\Delta,ij}^p|, C_{\Delta}^p = C_{\Delta}(M_{\Delta}^{\max}, v_p)v_p, \\ i &= \overline{1,6}, j = \overline{1,6}; \\ D_{\Delta}^p &= D_{\Delta}(d_{\Delta 1}^{\max}, d_{\Delta 2}^{\max}, v_p)v_p, \\ v_p &= (|v_x|, |v_y|, |v_z|, |\omega_x|, |\omega_y|, |\omega_z|)^T; \\ \tau_{np} &= (|\tau_{nx}|, |\tau_{ny}|, |\tau_{nz}|, |M_{nx}|, |M_{ny}|, |M_{nz}|)^T, \end{aligned} \quad (17)$$

где $M_{\Delta}^{\max} = \begin{bmatrix} \bar{m}_{11} & \dots & \bar{m}_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{m}_{61} & \dots & \bar{m}_{66} \end{bmatrix}$; $d_{\Delta 1}^{\max} = (\bar{d}_{\Delta 11}, \dots, \bar{d}_{\Delta 16})$; $d_{\Delta 2}^{\max} = (\bar{d}_{\Delta 21}, \dots, \bar{d}_{\Delta 26})$ — максимальные значения отклонений параметров АНПА от их номинальных значений; $k_{\tau} = \bar{\tau}_{\Delta}/|\tau_n^{\max}|$, $\tau_n^{\max}$ — максимальные значения силы тяги или момента, создаваемые движителями с номинальными параметрами. Для расчета величины $g_{\Delta}^{\max}(\eta)$ представим вектор $g(\eta)$ в виде

$$g(\eta, P) \approx g(\eta, P_n) + \frac{\partial g(\eta, P)}{\partial P} P_{\Delta}, \quad (18)$$

где

$$P = (W, B, x_g, y_g, z_g, x_B, y_B, z_B)^T, P = P_n + P_{\Delta}.$$

Используя выражение (18), можно записать:

$$g_{\Delta}^{\max}(\eta) = G_{\Delta p} P_{\Delta}^{\max}, G_{\Delta p, ik} = \left| \left(\frac{\partial g(\eta, P)}{\partial P} \right)_{ik} \right|, \quad (19)$$

$$i = \overline{1,6}, k = \overline{1,8},$$

где $P_{\Delta}^{\max} = (\bar{W}_{\Delta}, \bar{B}_{\Delta}, \bar{x}_{\Delta g}, \bar{y}_{\Delta g}, \bar{z}_{\Delta g}, \bar{x}_{\Delta B}, \bar{y}_{\Delta B}, \bar{z}_{\Delta B})^T$ — вектор максимальных по модулю отклонений параметров гидростатических сил и моментов от их номинальных значений.

Если в процессе движения АНПА величина $|e_m|$ часто становится меньше некоторой допустимой положительной величины e_d , то разрывной сигнал (11) эффективнее заменить сигналом

$$\text{sat}(e_m) = \begin{cases} \text{sign}(e_m), & \text{если } |e_m| \geq e_d; \\ k_s e_m, & \text{если } |e_m| < e_d, \end{cases} \quad (20)$$

где $k_s = 1/e_d$.

Полученный закон управления скоростями движения АНПА (7), (8), (11), (17), (19) позволяет придать желаемые динамические свойства модели (10) при любых изменениях их параметров в диапазонах (6).

Синтез контура управления положением АНПА

После синтеза контура управления скоростью движения АНПА выполняется синтез контура управления его положением и ориентацией. При этом пространственное движение АНПА при использовании закона управления (7), (8), (11), (17), (19) описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{v} + \Lambda v &= \dot{v}_d + \Lambda v_d, \\ \dot{\eta} &= J(\eta)v. \end{aligned} \quad (21)$$

Для синтеза системы управления положением АНПА систему (21) сведем к одному уравнению [14, 15]:

$$\ddot{\eta} = J(\dot{v}_d + \Lambda v_d) + (\dot{J} - J\Lambda)J^{-1}\dot{\eta}. \quad (22)$$

Уравнение, которое будет описывать желаемую динамическую модель движения АНПА в абсолютной СК, зададим в виде

$$\ddot{\eta} + \Lambda \dot{\eta} + \delta \eta = \Lambda \dot{\eta}_d + \delta \eta_d, \quad (23)$$

где $\eta_d \in R^6$ — вектор желаемого положения и ориентации АНПА в абсолютной СК; $\delta \in R^{6 \times 6}$ — диагональная матрица положительных коэффициентов, которую целесообразно выбрать в виде $\delta = \Lambda^2/4$ [14], позволяющем перемещать АНПА в заданное положение с заданной ориентацией без перерегулирования.

Выразив в (23) переменную $\ddot{\eta}$ и приравняв полученное выражение к правой части уравнения (22), получим

$$\begin{aligned} J(\dot{v}_d + \Lambda v_d) + (\dot{J} - J\Lambda)J^{-1}\dot{\eta} = \\ = \Lambda(\dot{\eta}_d - \dot{\eta}) + \delta(\eta_d - \eta). \end{aligned} \quad (24)$$

Из уравнения (24) с учетом второго уравнения (21) можно получить

$$\begin{aligned} \dot{v}_d = J^{-1}\delta(\eta_d - \eta) + \Lambda(v - v_d + J^{-1}\dot{\eta}_d) - \\ - J^{-1}(\Lambda J + \dot{J})v. \end{aligned} \quad (25)$$

Очевидно, что выражение (25), учитывающее кинематику АНПА, обеспечивает его пространственное движение в абсолютной СК в соответствии с желаемой моделью движения, описываемой уравнением (23).

Для реализации системы управления, описываемой выражениями (7), (8), (11), (17), (19), (25), необходимо знать номинальные параметры АНПА и возможные диапазоны их изменения, а также задать матрицу Λ , описывающую его желаемые динамические свойства. Вход в насыщения движителей АНПА можно исключить с помощью дополнительных систем автоматического формирования программных скоростей движения АНПА [20, 21].

Результаты моделирования

Для проверки эффективности предложенного подхода было проведено математическое моделирование в среде MATLAB. В процессе моделирования рассматривался АНПА, имеющий следующие параметры:

$$\begin{aligned} m_a &= 170 \text{ кг}, \\ \text{моменты инерции } J_{xx} &= 10,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \\ J_{yy} &= 23,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, J_{zz} = 23,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \\ d_1 &= (18 \text{ Н} \cdot \text{с/м}, 105 \text{ Н} \cdot \text{с/м}, 105 \text{ Н} \cdot \text{с/м}, \\ &20 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, 80 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, 80 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}), \\ d_2 &= (18 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2, 105 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2, 105 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2, \\ &20 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2, 80 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2, 80 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2), \\ x_G &= 0,0 \text{ м}, y_G = 0,0 \text{ м}, z_G = -0,05 \text{ м}, \\ x_B &= 0,0 \text{ м}, y_B = 0,0 \text{ м}, z_B = 0,0 \text{ м}, \\ \text{MA} &= \text{diag}(15 \text{ кг}, 185 \text{ кг}, 185 \text{ кг}, 5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \\ &19,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, 19,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2). \end{aligned}$$

В процессе моделирования полагалось, что динамика движителей АНПА по каждой степени свободы описывается уравнениями вида $\tau = 10(\tau_d - \tau)$, где τ_d — сигнал, формируемый системой управления.

Изменения параметров АНПА во время его движения:

$$\begin{aligned} m_\Delta &= 140 \text{ кг}, J_{\Delta xx} = 4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \\ J_{\Delta yy} &= 7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, J_{\Delta zz} = 7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \\ d_{\Delta 1}^{\max} &= (9 \text{ Н} \cdot \text{с/м}, 50 \text{ Н} \cdot \text{с/м}, \\ &50 \text{ Н} \cdot \text{с/м}, 10 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, \\ &30 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}, 30 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}), \\ d_{\Delta 2}^{\max} &= (9 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2, 50 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2, \\ &50 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2, 10 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2, \\ &30 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2, 30 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2), \\ x_{\Delta B} &= 0,05 \text{ м}, y_{\Delta B} = 0,0 \text{ м}, \\ z_{\Delta B} &= 0,1 \text{ м}, k_\tau = 0,1. \end{aligned} \quad (26)$$

Диагональная матрица Λ , задающая желаемые динамические свойства АНПА, имела вид $\Lambda = (0,4, 0,4, 0,4, 2, 2, 2)$.

В процессе моделирования исследовалось движение АНПА в двух режимах. В первом режиме АНПА выходил из начальной точки с координатами (0 м, 0 м, 0 м, 0 рад, 0 рад, 0 рад) абсолютной СК в точку (10 м, 10 м, 5 м, 0 рад, 1,0 рад, 1,0 рад), а во втором выходил из той же точки, но двигался вдоль программной траектории $(1,0t, 10 \cos(0,002t) - 10, 5)$.

Результаты моделирования движения АНПА (законы изменения элементов вектора динамических ошибок $\varepsilon_\eta = \eta_d - \eta = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_\theta, \varepsilon_\psi)^T$) при использовании системы управления, содержащей нелинейные регуляторы скорости (8) и положения (25), при номинальных значениях параметров АНПА показаны на рис. 2. Из представленных рисунков видно, что, если АНПА имеет номинальные параметры, то его выход в заданное положение осуществляется в соответствии с желаемым законом изменения координат, а динамические ошибки при его движении по траектории после затухания переходных процессов не превышают 0,2 м.

После изменения параметров АНПА (26) во время транспортировки груза возникает статическая ошибка по углу дифферента (рис. 3) за счет появления гидростатических моментов. Это недопустимо при маневрировании вблизи подводных объектов. А в процессе движения АНПА по траектории динамические ошибки по некоторым координатам возрастают до 3 м.

Введение дополнительного сигнала самонастройки по эталонной модели позволяет компенсировать негативные последствия от изме-

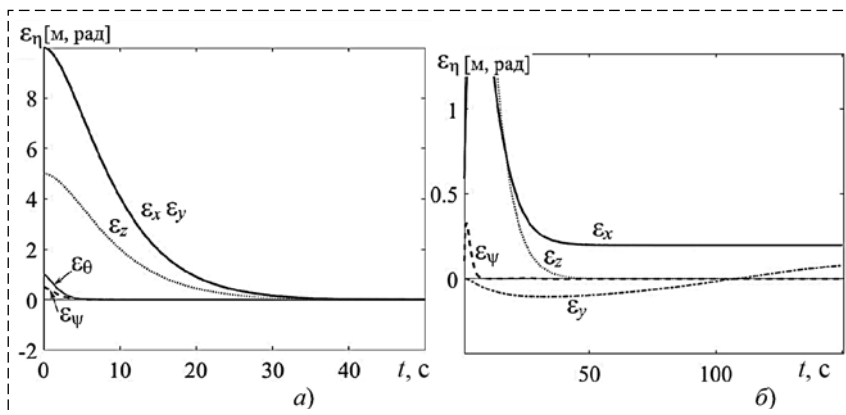


Рис. 2. Процесс изменения элементов вектора динамической ошибки АНПА при позиционном перемещении к заданной точке с заданной ориентацией (а) и при контурном управлении по заданной траектории (б)

Fig. 2. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector at movement to target point with desired orientation (a) and tracking control along desired trajectory (b)

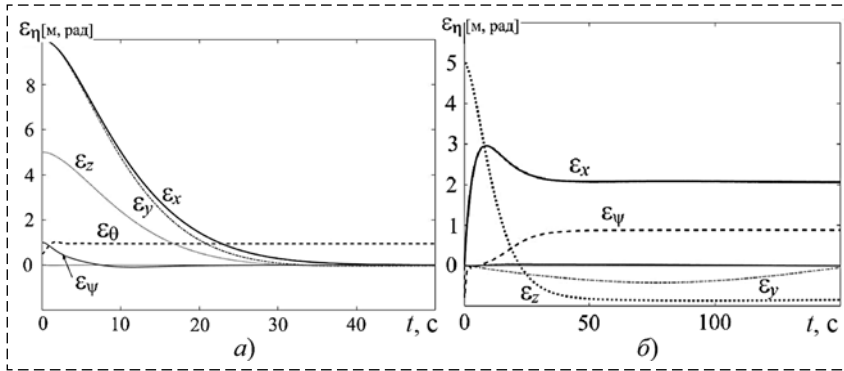


Рис. 3. Процесс изменения элементов вектора динамической ошибки при позиционном перемещении АНПА к заданной точке с заданной ориентацией (а) и при контурном управлении по заданной траектории (б) после отклонения его параметров от номинальных значений в соответствии с (26)

Fig. 3. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector at movement to target point with desired orientation (a) and tracking control along desired trajectory (b) when AUV parameters deviate from its nominal values according with (26)

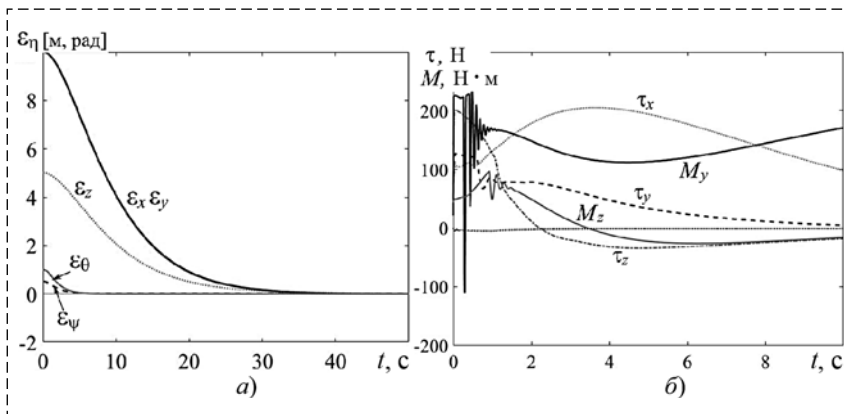


Рис. 4. Процесс изменения динамических ошибок АНПА (а), а также управляющих сил и моментов тяги движителей (б) при перемещении АНПА в заданную точку пространства

Fig. 4. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector (a) and control forces and torques (b) at movement to target point with desired orientation

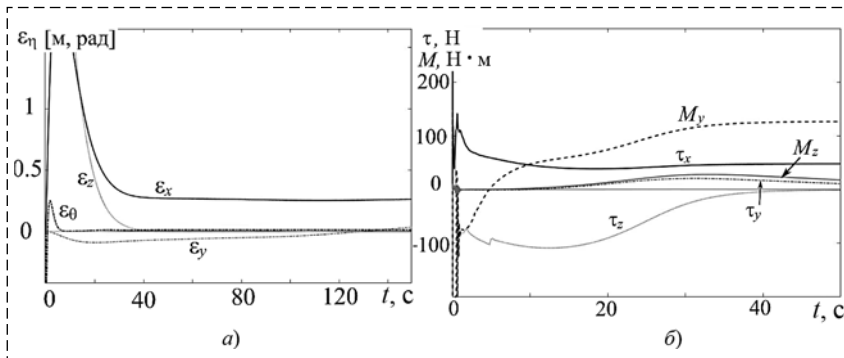


Рис. 5. Процесс изменения динамических ошибок АНПА (а), управляющих сил и моментов (б) при его движении по заданной траектории

Fig. 5. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector (a) and control forces and torques (b) at movement along desired trajectory

нений параметров АНПА. Из рис. 4, а видно, что при подходе АНПА к заданному положению с использованием системы управления (8), (11), (17), (25) статические ошибки не возникают, а разрывная составляющая сигнала

этого управления с уменьшающейся амплитудой сигнала самонастройки присутствует только на начальном этапе его движения (рис. 4, б), когда производная выходного сигнала эталонной модели имеет максимальное значение, и действует всего в течение 1,5 с. После того, как ошибка e_m становится по модулю меньше e_d , сигнал управления (20) обеспечивает плавное изменение сил и моментов тяги всех движителей АНПА.

При движении АНПА вдоль заданной траектории (рис. 5) введение сигнала (20) при использовании системы управления (8), (11), (17), (25) позволяет ограничить значение динамической ошибки до 0,3 м. Это особо важно для обеспечения согласованного движения группы АНПА. При этом после окончания переходных процессов синтезированные системы, легко реализуемые на бортовых ЦВМ, во время контурного управления не используют разрывные сигналы.

Для сравнения на рис. 6, 7 показан процесс изменения координат АНПА при использовании в каждом его канале управления типовых ПИД регуляторов, параметры которых настраивались так, чтобы переходные процессы во всех каналах управления его линейными координатами завершались через 30 с, а вращательными — через 5 с и не имели перерегулирования.

На рис. 6, а показан процесс изменения ошибок АНПА с номинальными параметрами при его переходе из точки с координатами (0 м, 0 м, 0 м, 0 рад, 0 рад, 0 рад) абсолютной СК в точку с координатами $\eta_d = (10 \text{ м}, 10 \text{ м}, 5 \text{ м}, 0 \text{ рад}, 1,0 \text{ рад}, 1,0 \text{ рад})$, когда его параметры имели номинальные значения, а на рис. 6, б показаны

эти же процессы, когда параметры АНПА отличались от номинальных на величины (26). Из рис. 6 видно, что изменение параметров АНПА приводит к появлению перерегулирования и затягиванию переходных процессов по отдель-

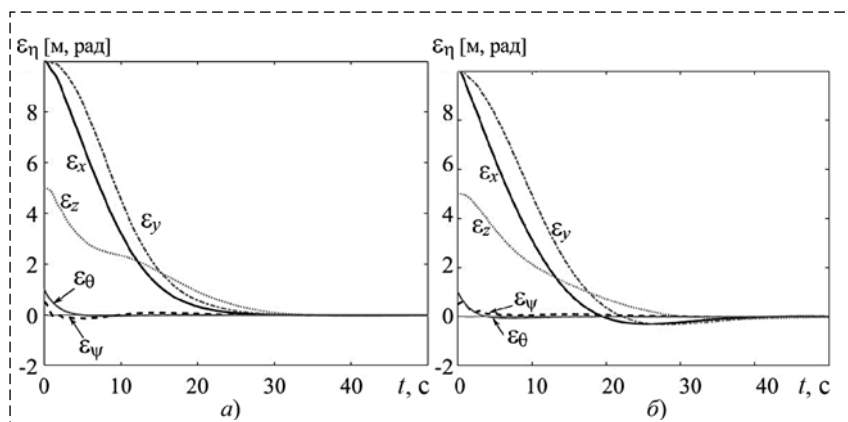


Рис. 6. Процесс изменения ошибок АНПА, использующих ПИД регуляторы при позиционном управлении

Fig. 6. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector at position control when PID-controllers are used

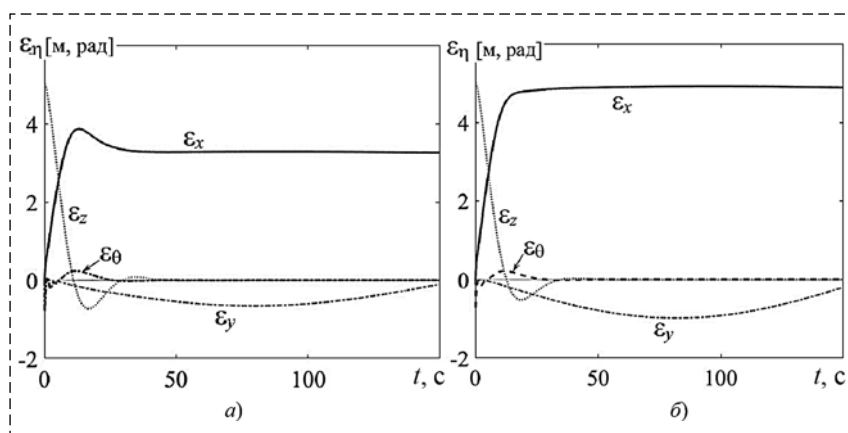


Рис. 7. Процесс изменения ошибок АНПА, использующих ПИД регуляторы при контурном управлении

Fig. 7. Process of changing entries of AUV dynamic errors vector at tracking control when PID-controllers are used

ным степеням свободы. Это может быть неприемлемо при необходимости маневрирования вблизи подводных сооружений.

На рис. 7 показана динамическая ошибка слежения по отдельным степеням свободы при использовании ПИД регуляторов для управления движением АНПА по траектории $\eta_d = (1.0t, 10 \cos(0.002t) - 10, 5)$. Из рис. 7, а видно, что значение динамической ошибки по координате x может превышать 3,2 м, а по координате y — 0,6 м при номинальных параметрах АНПА и, соответственно, 5 м по координате x и 1 м по координате y (рис. 7, б) при их отклонении на величины (26). При выполнении операций группой АНПА такие динамические ошибки неприемлемы.

Таким образом, результаты математического моделирования показали, что предложенная двухконтурная система управления с эталон-

ной моделью позволяет обеспечить высокоточное управление движением АНПА в различных режимах их работы и при больших изменениях параметров. Реализация этой системы не вызывает затруднений, а сигнал управления не содержит разрывных составляющих с большой амплитудой и не приводит к негативным воздействиям на механическую часть движительного комплекса АНПА.

Заключение

В работе предложен метод синтеза системы управления пространственным движением АНПА, позволяющей учесть перекрестные связи между его степенями свободы, а также переменные или неопределенные параметры. Эта система содержит два контура. Первый включает в себя комбинированную систему, содержащую нелинейный регулятор для достижения желаемых динамических характеристик АНПА, когда его параметры равны номинальным значениям, и регулятор с самонастройкой по эталонной модели, обеспечивающей компенсацию неопре-

деленной или переменной части параметров. При этом параметры регулятора с эталонной моделью выбираются так, чтобы уменьшить возможную амплитуду разрывного сигнала управления скоростью движения АНПА. Второй контур представляет собой нелинейный регулятор положения, позволяющий учесть динамические свойства контура управления скоростью и кинематические свойства АНПА. Преимуществом предложенной системы управления по сравнению с традиционными, построенными на основе ПИД регуляторов, является более высокая точность управления при движении по сложным пространственным траекториям независимо от изменения параметров АНПА.

Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность синтезированной двухконтурной системы с эталонной моделью.

1. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles // *Intelligent Service Robotics*. 2011. N. 2. P. 221–231.
2. Yu L. et al. Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends // *Proc. of the 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Lancaster, United Kingdom. 2019. P. 1–6.
3. Lei M. Nonlinear diving stability and control for an AUV via singular perturbation // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 197, N. 1. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106824
4. Juul D. L., McDermott M., Nelson E. L., Barnett D. M., Williams G. N. Submersible control using the linear quadratic Gaussian with loop transfer recovery method // *Proc. of IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology (AUV'94)*, Cambridge, MA, USA. 1994. P. 417–425.
5. Lakhwani D. A., Adhyaru D. M. Performance comparison of PD, PI and LQR controller of autonomous under water vehicle // *Proc. of the 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*, Ahmedabad. 2013. P. 1–6.
6. Gonzalez J., Benezra A., Gomariz S., Sarriá D. Limitations of linear control for Cormoran-AUV // *Proc. of the 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Graz, 2012. P. 1726–1729.
7. Wu H., Song S., You K., Wu C. Depth control of model-free AUVs via reinforcement learning // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2019. Vol. 49, N. 12. P. 2499–2510.
8. Liu X., Zhang M., Rogers E. Trajectory tracking control for autonomous underwater vehicles based on fuzzy re-planning of a local desired trajectory // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68, N. 12. P. 11657–11667.
9. Narasimhan M., Singh S. N. Adaptive optimal control of an autonomous underwater vehicle in the dive plane using dorsal fins // *Ocean Engineering*. 2006. Vol. 33. P. 404–416.
10. Koofgar H. R. Adaptive control of underwater vehicles with unknown model parameters and unstructured uncertainties // *Proc. of the 2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, Akita, 2012. P. 192–196.
11. Lebedev A. V., Filaretov V. F. The synthesis of multi-channel adaptive variable structure system for the control of AUV // *Proc. of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 2008. P. 2834–2839.
12. Xu J., Wang M., Qiao L. Dynamical sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated unmanned underwater vehicles // *Ocean Engineering*. 2015. Vol. 105. P. 54–63.
12. Lebedev A. V., Filaretov V. F. Self-adjusting system with a reference model for control of underwater vehicle motion // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2015. Vol. 51, N. 5. P. 462–470.
14. Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А. Системы и устройства управления подводных роботов, М.: Наука, 2005, 270 с.
15. Filaretov V., Yukhimets D. Synthesis Method of Control System for Spatial Motion of Autonomous Underwater Vehicle // *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJEM)*. 2012. Vol. 3, N. 3. P. 133–141.
16. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве / Под ред. В. Ф. Филаретова, Владивосток: Дальнаука, 2016, 400 с.
17. Филаретов В. Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов, Владивосток: ДВГТУ, 2000, 304 с.
18. Slotine J. Applied nonlinear control. Prentice-Hall, 1991, 461 p.
19. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011, 582 p.
20. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Щербатюк А. Ф., Мурсалимов Э. Ш., Туфанов И. Е. Новый метод контурного управления АНПА // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 8. С. 46–56.
21. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. The new strategy of designing tracking control systems for dynamical objects with variable parameters // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2018. Т. 19, № 7. С. 435–442.

Two-Loop System with Reference Model for Control of Spatial Movement of Cargo Underwater Vehicle

V. F. Filaretov, filaret@iacp.dvo.ru, D. A. Yukhimets, undim@iacp.dvo.ru,

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation

Corresponding author: Yukhimets Dmitry, Dr.Sc., Associate Professor, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: undim@iacp.dvo.ru

Accepted on July 30, 2020

Abstract

Currently, autonomous underwater vehicles (AUV) are increasingly used to perform tasks related to the maintenance of underwater communications and various underwater production complexes, as well as performing underwater technological operations. To effectively perform these operations, AUV must have high-quality control systems that will ensure their accurate movement both along long spatial trajectories formed during their movement to the objects of work, and when performing complex maneuvers near underwater infrastructure objects. At the same time, the main difficulty that arises in the process of synthesis of AUV control systems is the significant non-linearity of the dynamic models of these control objects, the presence of interactions between their degrees of freedom, as well as the uncertainty and variability of their parameters. In this paper, we propose a method for synthesizing the spatial motion control system of the AUV, which allows us to take into account these negative effects. This system contains two loops. The first loop includes a combined system containing a nonlinear controller to achieve the desired dynamic characteristics of the AUV, when its parameters are equal to the nominal values, and a controller with self-tuning according to the reference model, which provides compensation for an unknown or variable part of the parameters. In this case, the parameters of the controller with the reference model are selected to reduce the possible amplitude of the discontinuous signal for controlling the AUV velocity. The second loop is a non-linear position controller that allows to take into account the dynamic properties of the velocity control loop and the

kinematic properties of the AUV. The advantage of the proposed control system in comparison with traditional ones based on PID controllers is a higher control accuracy when moving along complex spatial trajectories, regardless of changes in the AUV parameters. The simulation results confirmed the high efficiency of the synthesized two-loop control system.

Keywords: autonomous underwater vehicle, control system, nonlinear control, self-tuning, reference model, parametric uncertainty

Acknowledgements: This work was supported by Russian Foundation for Basic Researches (grants No 19-08-00347).

For citation:

Filaretov V. F., Yukhimets D. A. Two-Loop System with Reference Model for Control of Spatial Movement of Cargo Underwater Vehicle, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 134–144.

DOI: 10.17587/mau.22.134-144

References

1. Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles, *Intellegent Service Robotics*, 2011, no. 2, pp. 221–231.
2. Yu L. et al. Inspection Robots in Oil and Gas Industry: a Review of Current Solutions and Future Trends, *Proc. of the 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Lancaster, United Kingdom, 2019, pp. 1–6.
3. Lei M. Nonlinear diving stability and control for an AUV via singular perturbation, *Ocean Engineering*, 2020, vol. 197, no. 1, doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106824.
4. Juul D. L., McDermott M., Nelson E. L., Barnett D. M., Williams G. N. Submersible control using the linear quadratic Gaussian with loop transfer recovery method, *Proc. of IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology (AUV'94)*, Cambridge, MA, USA, 1994, pp. 417–425.
5. Lakhwani D. A., Adhyaru D. M. Performance comparison of PD, PI and LQR controller of autonomous under water vehicle, *Proc. of the 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*, Ahmedabad, 2013, pp. 1–6.
6. Gonzalez J., Benezra A., Gomariz S., Sarriá D. Limitations of linear control for Cormoran-AUV, *Proc. of the 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Graz, 2012, pp. 1726–1729.
7. Wu H., Song S., You K., Wu C. Depth control of model-free AUVs via reinforcement learning, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, vol. 49, no. 12, pp. 2499–2510.
8. Liu X., Zhang M., Rogers E. Trajectory tracking control for autonomous underwater vehicles based on fuzzy re-planning of a local desired trajectory, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, vol. 68, no. 12, pp. 11657–11667.
9. Narasimhan M., Singh S. N. Adaptive optimal control of an autonomous underwater vehicle in the dive plane using dorsal fins, *Ocean Engineering*, 2006, vol. 33, pp. 404–416.
10. Koofigar H. R. Adaptive control of underwater vehicles with unknown model parameters and unstructured uncertainties, *Proc. of the 2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, Akita, 2012, pp. 192–196.
11. Lebedev A. V., Filaretov V. F. The synthesis of multi-channel adaptive variable structure system for the control of AUV, *Proc. of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 2008, pp. 2834–2839.
12. Xu J., Wang M., Qiao L. Dynamical sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated unmanned underwater vehicles, *Ocean Engineering*, 2015, vol. 105, pp. 54–63.
13. Lebedev A. V., Filaretov V. F. Self-adjusting system with a reference model for control of underwater vehicle motion, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 462–470.
14. Filaretov V. F., Lebedev A. V., Yukhimets D. A. Systems and devices for control of underwater robots, Moscow, Nauka, 2005, 270 p (in Russian).
15. Filaretov V., Yukhimets D. Synthesis Method of Control System for Spatial Motion of Autonomous Underwater Vehicle, *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM)*, 2012, vol. 3, no. 3, pp. 133–141.
16. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. Features of Synthesis of High-Accuracy Control System of Movement and Spatial Stabilization of Underwater Vehicles, Vladivostok, Dalnauka, 2016, 400 p. (in Russian).
17. Filaretov V. F. Self-tuning systems for control of manipulator actuators, Vladivostok, Publishing house of DVGUTU, 2000, 304 p (in Russian).
18. Fossen T. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011, 582 p.
19. Slotine J. Applied nonlinear control, Prentice-Hall, 1991, 461 p.
20. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. The new strategy of designing tracking control systems for dynamical objects with variable parameters, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 7, pp. 435–442.
21. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Scherbatyuk A. F., Mursalimov E. Sh., Tuphanov I. E. The Method of Tracking Control of Autonomous Unmanned Underwater Vehicle Motion, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 8, pp. 46–56 (in Russian).

V. I. Finaev, vifinaev@sfedu.ru, **M. Yu. Medvedev**, medvmihal@sfedu.ru, **V. Kh. Pshikhov**, pshichop@rambler.ru,
V. A. Pereverzev, vapereverzev@sfedu.ru, **V. V. Soloviev**, vvsolovev@sfedu.ru,
 Southern Federal University, Taganrog, 347928, Russian Federation

Corresponding author: **Medvedev Mikhail Yu.**, D. Sc, Southern Federal University,
 Taganrog, 347928, Russian Federation, e-mail: medvmihal@sfedu.ru

Accepted on November 25, 2020

Unmanned Powerboat Motion Terminal Control in an Environment with Moving Obstacles

Abstract

The major point for consideration throughout this paper is controlling the motion of an unmanned powerboat in an obstructed environment with stationary and moving objects. It offers a procedure for the terminal control law development based on the powerboat programmed motion trajectory in a polynomial form and proposes position-trajectory-based control algorithms. A hybrid method based on virtual fields and unstable driving modes, taking into account powerboat speeds and obstacles, is used to plan motion trajectories for obstacle avoidance. There were experiments carried out to test the developed methods and algorithms meanwhile estimating the energy consumption for control, the length of the trajectory and the safety indicator for obstacle avoidance. The novelty of the proposed approach lies in the method used to develop a local movement trajectory in the field with obstacles and in the hybridization of trajectory scheduling methods. This approach allows us to achieve a given safe distance when avoiding obstacles and virtually eliminate the chances of an emergency collision. The presented results can be used in systems of boats autonomous motion control and allow safe stationary and dynamic obstacles avoidance.

Keywords: terminal control, potential field method, position-trajectory control, quality indicators, speed control, unmanned powerboat

Acknowledgments: The work was supported by grant N 18-19-00621 of Russian Scientific Foundation.

For citation:

Finaev V. I., Medvedev M. Yu., Pshikhov V. Kh., Pereverzev V. A., Soloviev V. V. Unmanned Powerboat Motion Terminal Control in an Environment with Moving Obstacles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 145—154.

DOI: 10.17587/mau.22.145-154

УДК 004.896

DOI: 10.17587/mau.22.145-154

В. И. Финаев, д-р техн. наук, vifinaev@sfedu.ru, **М. Ю. Медведев**, д-р техн. наук, medvmihal@sfedu.ru,
В. Х. Пшихов, д-р техн. наук, pshichop@rambler.ru,
В. А. Переверзев, ст. науч. сотр., vapereverzev@sfedu.ru,
В. В. Соловьев, ст. науч. сотр., vvsolovev@sfedu.ru,
 ФГАОУ ВО Южный Федеральный университет, Таганрог

Терминальное управление безэкипажным катером в среде с подвижными препятствиями

В данной работе основным предметом исследования является система управления движением безэкипажного катера в неопределенной среде со стационарными и подвижными препятствиями. Актуальность разработки такой системы обусловлена тем, что безэкипажные катера функционируют вблизи портов, судоходных фарватеров и в других местах с плотным движением других судов. При этом из-за отсутствия экипажа нет возможности согласовывать движение с другими судами, поэтому система управления такого безэкипажного катера должна прокладывать маршрут, учитывая требования к своему положению в каждый момент времени.

В связи с этим в статье предложена процедура разработки терминального закона управления на основе программируемой траектории движения катера в полиномиальной форме, на основе которой реализованы позиционно-траекторные алгоритмы управления. При этом программная траектория строится как решение задачи терминального управления в сильной постановке, а позиционно-траекторный регулятор обрабатывает полученную траекторию в рамках слабого терминального управления. Для учета препятствий при планировании траектории используется гибридный метод, основанный на виртуальных полях и неустойчивых режимах движения с учетом скоростей и условий движения безэкипажного катера. В работе приводятся результаты численных и натурных экспериментов по апробации разработанных методов и алгоритмов. Получены оценки энергозатрат на управление, длины траектории и показателя безопасности при обходе препятствий.

Новизна предлагаемого подхода заключается в использовании нового метода построения локальной траектории движения в поле с препятствиями и в гибридизации методов планирования траекторий. Такой подход позволяет обеспечить заданную безопасную дистанцию при обходе препятствий и практически исключить вероятность аварийного столкновения. Представленные результаты могут быть использованы в системах автономного управления движением катеров и позволяют безопасно обходить стационарные и динамические препятствия.

Ключевые слова: терминальное управление, метод потенциальных полей, позиционно-траекторное управление, показатели качества, управление скоростью, безэкипажный катер

Introduction

Autonomous moving objects (robots) are controlled in two-dimensional and tridimensional space, as well as in various environments (in air, above water, under water, on the surface). The control is implemented in automatic as well as automated modes in both deterministic defined and non-defined environments. Automatic movement of moving objects (MO) can be performed either along the prescheduled trajectories or in an unspecified environment with specified coordinates of the goal point with stationary and moving obstacles. There may be no time limits for the goal being reached; however, there may also be a requirement for the MO achieving the goal within the time set. Multiple practical examples can be cited with relation to controlling a single or a group of MOs in different environments under different conditions for the goal achievement. One example is an aircraft, when being autopiloted, is capable of performing an autonomous flight along a prescheduled trajectory and of independent landing onto a specially prepared aerodrome using navigation systems [1]. Other instances include quadcopters, which will automatically fly along a predetermined trajectory, and robotic sea powerboats, which are already in service with a number of countries. A good example is Tesla autopilot vehicles [2] and similar vehicles by other developers (Toyota, Volvo, Mercedes, etc.) that are already in use on the roads.

Software control systems are undergoing steady improvement, and nowadays control systems can identify the environment [3–7], solve problems of moving a single MO and groups of MOs using analytical methods [8–10], or, under significant uncertainty, using neuro-fuzzy networks, genetic algorithms, contingency approach and methods aimed at enhancing the specialists' knowledge of [11–15].

Even though up-to-date scientific methods and MO control technologies allow solving MO movement problems in complex, non-deterministic environments, the terminal control problem remains quite relevant [16]. When solving the terminal control problem, the MO setting off from the starting point is supposed to reach the goal end point at a set time, given the fact that the operating environment is uncertain, which is the major focus of this paper.

The task of terminal control remains relevant and has been the subject of consideration in multiple scientific papers, since different methods have been suggested to solve this problem. One solution to the problem has been by using sliding modes,

for example, paper [17] covers a sliding mode implementation in some classes of nonlinear control systems. Another solution suggests using nonlinear control models, for example, paper [18] describes the two-mode nonlinear model implementation of control over a nonlinear object under given constraint concerning the state and control. The control is performed with several parameters being selected a priori, which evaluate the terminal area and parameters. When the object under control moves, these parameters are optimized in real-time mode by the terminal controller to achieve the goal set. The solution of the terminal control problem can also be based on a special kind nonlinear similarity conversion, which means with control over the state feedback, the transition of the initial system into a linear and stationary system is ensured in a special way [19]. This is the task for weak terminal control over discrete nonlinear systems with scalar output.

The problem of planning the motion trajectories of the mobile objects in environments with obstacles has been considered in numerous papers. A lot of papers considered the implementation of the potential field method. For example, the paper [20] proposed and analyzed control algorithms in environments with moving and stationary obstacles, providing MO control that prevents it from falling into the local minima of the potential field. In the paper [21], the application of methods for trajectories planning of moving objects based on fuzzy logic was considered. The authors have created elementary MO behavior models, and proposed a mechanism for their integration for MO management in an uncertain environment.

They pay attention to the use of unstable traffic patterns when scheduling MO trajectories. For instance, the paper [22] illustrates the use of control actions which stabilize robot trajectories in obstacle-free zones, as well as the application of the third Lyapunov theorem (the instability theorem) when a moving object is spotted in zones of stationary or non-stationary obstacles at distances less than the tolerable. The symbiosis of unstable driving modes and the method of potential fields can be considered, which allows the creation of hybrid control methods, as shown in papers [23, 24].

The analysis of known works enables us to identify prospects for further research in the field of terminal control using the potential field method, for scheduling the movement of an unmanned powerboat in case obstacles appear, and a method based on unstable modes, in case of a dangerous approach to them, which is the subject of this article.

The paper is organized as follows. Section 2 presents a mathematical model of a vessel, description of the onboard control system, and the synthesis of terminal control. Problem statement is given. Section 3 describes the obstacle avoidance method. Section 4 presents experimental results.

The mathematical model of the vessel and the synthesis of terminal control

Fig. 1 represents the experimental prototype of the vessel. The powerboat features the following overall dimensions: height 0.6 m, width 0.7 m, length 1.8 m. The superstructure (bulkhead) hosts the engine control unit 1, the autonomous motion control unit 2, camera information processing unit 3, batteries, WiFi router and integrated navigation



Fig. 1. An appearance of the unmanned vessel

tion system (see fig. 2). The mast places 3 cameras, WiFi and GPS modules.

Let the mathematical model of the vessel, in accordance with the coordinate system presented in fig. 1, s, have the following form:

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Q, \quad (1)$$

$$M\dot{Q} = F_u(Q, S, \delta, l, t) + F_d(P, V, W) + F_v(G, A, R), \quad (2)$$

where $S = [x_{gt} \ z_{gt} \ \varphi]^T$ stands for the gravity center coordinate vector of the vessel and the orienting angle in the fixed coordinate system; $Q = [V_x \ V_z \ \omega_y]^T$ stands for the projection of the velocity vector on the axis of the coordinate system associated with the power boat XYZ (see fig. 3); φ signifies current course, and ω_y is the angular velocity of the vessel relative to the vertical axis OY; $F_d(P, V, W) - (3 \times 1)$ represents the vector of non-linear dynamic elements, including Coriolis forces, $F_v(G, A, R) - (3 \times 1)$ means the vector of measured and non-measurable external disturbances; $M - (3 \times 3)$ stand for the matrix of mass-inertial parameters, whose elements are mass, inertia moments, apparent masses $F_v(Q, S, \alpha, l, t) - (3 \times 1)$ is the control forces and moments vector (l is the vector of design parameters, α is the deviation angle of engines from the X axis, t is time). A more detailed description of the mathematical model is presented in [25].

It is required to synthesize such a control algorithm that would ensure the vessel movement from

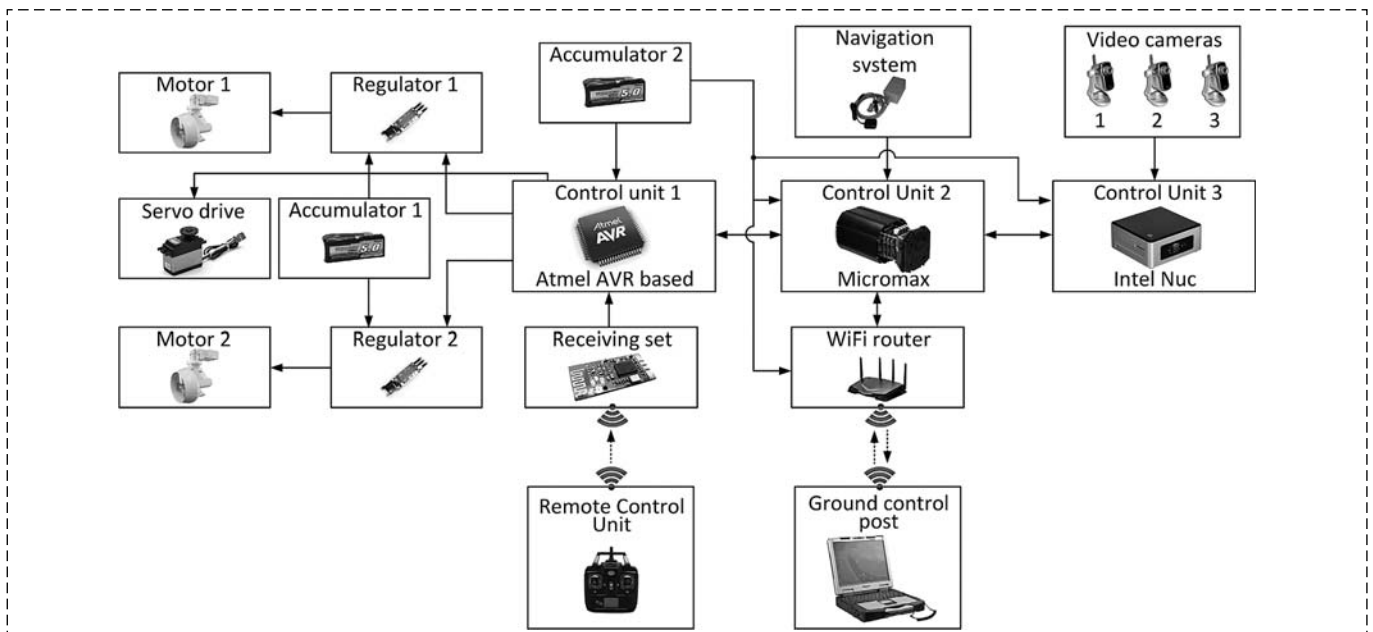


Fig. 2. Block diagram of the onboard control system

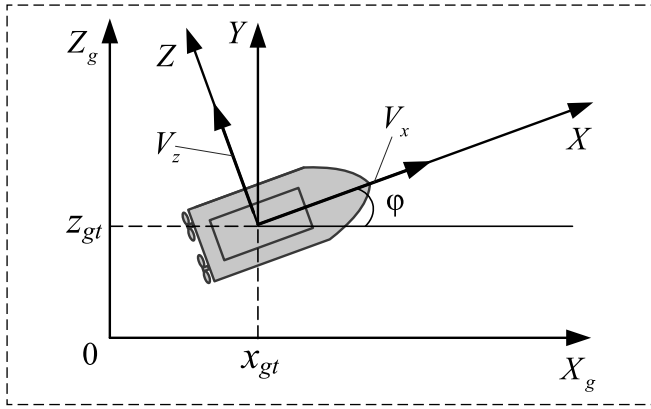


Fig. 3. The unmanned vessel coordinate system

the initial position $P_0 = (x_0, z_0)$ to the final position $P_k = (x_k, z_k)$ at a given moment of time $t = T_k$, and the speed at the moment of time $t = T_k$ should be zero, i.e.

$$Q_k = (V_x, V_z, \omega_y)^T = 0_{3 \times 1}.$$

To solve the problem of synthesizing the terminal control, we will define the programmed motion trajectory of the unmanned vessel in a polynomial form and present it in the matrix form:

$$S^* = CLS^* = CL, \quad (3)$$

where

$$C = \begin{bmatrix} x_0 & 0 & \frac{3}{T_k^2}(x_k - x_0) & \frac{3}{T_k^3}(x_k - x_0) \\ z_0 & 0 & \frac{3}{T_k^2}(z_k - z_0) & \frac{3}{T_k^3}(z_k - z_0) \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ t^3 \end{bmatrix}.$$

C is a matrix of constant coefficients depending on the initial and final position of the vessel, as well as on T_k which is the specified positioning time.

The degree of the polynomial L is determined by the number of terminal parameters. In this case, these are two coordinates and the speed.

It can be also shown that:

$$\dot{S}^* = CD_1 L,$$

$$\ddot{S}^* = CD_2 L,$$

$$\text{where } D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

The terminal control law is developed basing on position-trajectory algorithms [22]; to this end, the real trajectory deviation error is set from the given program in the following form:

$$\Psi_{tr} = S - S^* = S - CL.$$

Let us introduce an additional variable $\Psi = \dot{\Psi}_{tr} + T_1 \cdot \Psi_{tr}$, where T_1 is the diagonal matrix of constant dimensions (2×2) , $\dot{\Psi}_{tr} = \dot{S} - CD_1 L$. We also set the desired behavior of the closed-loop system in the form below:

$$\dot{\Psi} + T_2 \cdot \Psi = 0,$$

where T_2 is the diagonal matrix of constant dimension (2×2) . Thus, the desired behavior of the system, expressed through Ψ_{tr} , has the following form:

$$\ddot{\Psi}_{tr} + T_1 \dot{\Psi}_{tr} + T_2 (\dot{\Psi}_{tr} + T_1 \Psi_{tr}) = 0, \quad (4)$$

where $\dot{\Psi}_{tr} = \dot{S} - CD_1 L$, $\ddot{\Psi}_{tr} = \ddot{S} - CD_2 L$.

Upon substituting in (4) the equation of the vessel mathematical model (2) and expressing the corresponding control forces and moments vector F_v , we obtain the following control algorithm:

$$F_u = -MR^{-1}[\dot{R}Q - CD_2 L + T_1 \dot{\Psi}_{tr} + T_2 (\dot{\Psi}_{tr} + T_1 \Psi_{tr})] - F'_d. \quad (5)$$

To perform the stability analysis, we substitute the resulting expression (5) into the equation of the mathematical model (3).

$$\begin{cases} \dot{S} = RQ \\ \dot{Q} = R^{-1} \begin{bmatrix} \dot{R}Q - CD_2 L + T_1 (RR - CD_1 L) + \\ + T_2 (\dot{R}Q + R\dot{Q} - CD_2 L + \\ + T_1 (RQ - CD_1 L)) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

We shall set the Lyapunov function in the following form:

$$V = \Psi^T W \Psi,$$

where W is a diagonal positive definite matrix of size (2×2) . Then the derivative of the Lyapunov function has the form:

$$\dot{V} = -2[RQ - CD_1 L + T_1 \Psi_{tr}] \times \\ \times W [-T_2 (Q - CD_1 L + T_1 \Psi_{tr})].$$

We shall define the W matrix to be $WT_2 = G$ where G the diagonal positive definite dimension matrix of (2×2) , so we obtain the following expression for the derivative $\dot{V}(x)$:

$$\dot{V} = -2[RQ - CD_1 L + T_1 \Psi_{tr}] \times \\ \times G [RQ - CD_1 L + T_1 \Psi_{tr}].$$

Since G is a positive definite matrix, the function $\dot{V}$ is negative definite at all points. It is enough just to show that the value of $Q = -R^{-1}(CD_1L + T_1 \cdot \Psi_{tr})$ is not a solution of system (6). Thus, it can be affirmed that system (6) is asymptotically stable, taking into account the addition of Barabashin-Krasovsky [26].

Let's note that control algorithm (5) does not contain a singularity at the target point. This property is very important for terminal control systems [27, 28].

The local planning algorithms

General concept. Basing on the terminal control algorithm (5) the vessel moves in an unobstructed environment to the coordinates of the end point P_k . In case of obstacles in the field of repulsive forces of the virtual field (fig. 4), a local trajectory of circumventing the obstacle is formed and the coordinates of the unmanned powerboat are planned based on the method of potential fields, while the coordinates of the end point P_k are replaced by P_k^* . Besides, if obstacles arise in the vessel safety zone, coordinates are scheduled using the method based on an unstable driving mode. When the obstacles leave the virtual zone of repulsive forces, the regular terminal control mode is restarted, and a new of initial conditions vector is formed for the algorithm (5).

Now let us consider the methods for the powerboat coordinates planning.

Method of forming a local obstacle avoidance trajectory. When forming a local obstacle avoidance trajectory, the vision field of the vision system is divided into sectors, as shown in fig. 5. In accordance with fig. 5, the value of B determines the chord, which subtends the ends of the sector, and is equal to the radius of the safety zone of the boat.

To determine the number of sectors in the locator's view, you need to perform the following sequence of actions. First, the sector angles are calculated according to the formula:

$$\beta_s^* = 2 \arcsin\left(\frac{B}{D}\right), \quad (7)$$

where β_s^* is sector angle; D — stands for the range of the sensor system of the boat.

Then their number is determined by the formula

$$N = \left\lceil \frac{\rho}{\beta_s^*} \right\rceil, \quad (8)$$

where ρ is the angle of view of the technical vision system of the boat, $\lceil \cdot \rceil$ is the operation of extracting the integer part of a number, rounded upward.

By virtue of the fact that the locator vision field must be completely covered by sectors with identical angles, sector angles have to be adjusted in accordance with the expression

$$\beta_s = \frac{\rho}{N}. \quad (9)$$

If obstacles are spotted within the sector, the latter is marked with figure of one, as being prohibited for movement; otherwise, it is marked as free. The boat movement process can be organized in this case as the following sequence of steps.

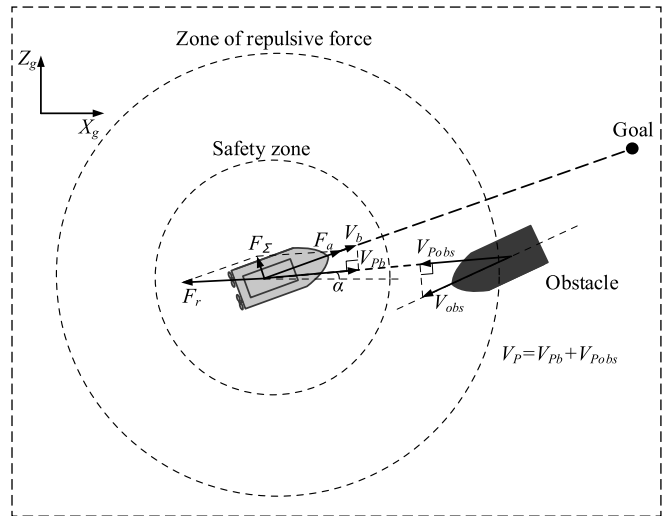


Fig. 4. Illustration of potential field forces action

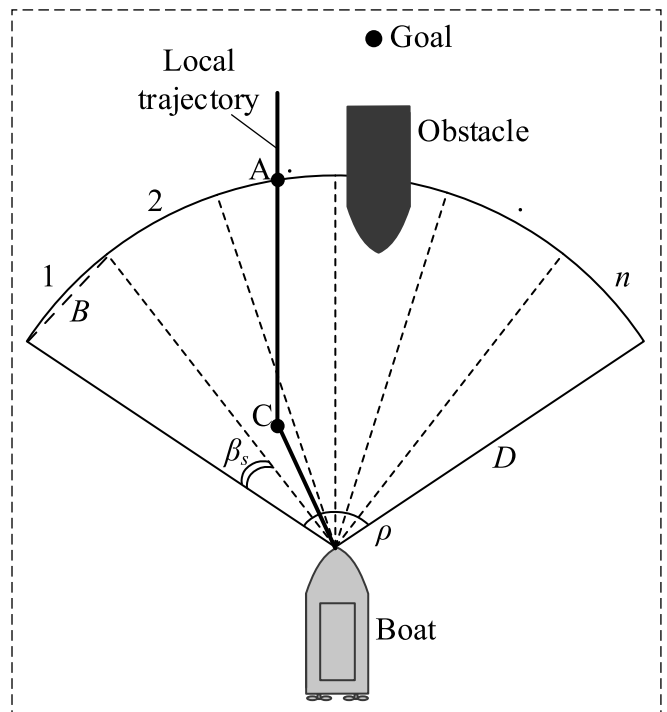


Fig. 5. The division of the vision field of the boat sensor system into sectors

Step 1. The sensory system visual field sectors are analyzed: if there is an obstacle in the sector, the sector is marked as prohibited (1), or otherwise, as free (0).

Step 2. The sector analysis towards the target point. Proceed to step 6 if the sector is marked as free (0), or to step 3 if the sector is marked as busy (1).

Step 3. Search for the nearest free sector towards the target point: if there are none, proceed to step 6, otherwise go to step 4.

Step 4. Calculation of the coordinates of point A in the middle of the sector.

Step 5. Calculate the coordinates of point C at a distance of $1/3$ from the boat to point A .

Step 6. The end.

After point C becomes target for the boat, and one is used in the calculation of the potential field forces. As soon as it is reached, point A becomes the target. If all sectors of the visual field are busy, the movement direction is selected randomly beyond the vision field of the technical vision system.

The method of virtual (potential) fields. The virtual (potential) fields method is a widespread method for planning the moving objects trajectories [29, 30] due to a number of advantages, in particular:

- Low requirements for the moving object on-board computer;
- Low requirements for the moving object sensory subsystem;
- Inaccurate (approximate) information being tolerable to use, concerning the coordinates of the obstacles and the target point;
- Ample opportunities for modification.

However, alongside with the advantages, this method features a number of the disadvantages listed below:

- the emergence of areas with local minimum fields throughout which a moving object can not continue moving towards the target point;
- low efficiency when used in three-dimensional environments and in flat environments with complex obstacles;
- the impossibility of taking into account the dynamics of a moving object which results in ineffective implementation of the scheduled trajectory.

These drawbacks hinder the independent use of this method to schedule the moving objects trajectories in an environment with obstacles. Nevertheless, the considerable room for modification allow synthesizing hybrid scheduling methods that reduce the drawbacks above.

Let us consider a nonpotential field when repulsive forces depend on the moving object speed and, therefore, are non-conservative (see fig. 4).

In this paper, the components of the attracting virtual force to the target point are defined by the formula:

$$\begin{bmatrix} F_{ax} \\ F_{az} \end{bmatrix} = k \frac{\begin{bmatrix} x_g \\ z_g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_r \\ z_r \end{bmatrix}}{d_{rg}}, \quad (10)$$

where x_r, z_r are the moving object coordinates; x_g, z_g stand for the target point coordinates; d_{rg} is the distance between the moving object and the target; k is the coefficient of attractive force ($k > 0$).

The distance between the moving object and the target is calculated using the expression:

$$d_{rg} = \sqrt{(x_r - x_g)^2 + (z_r - z_g)^2}, \quad (11)$$

The components of the repulsive potential force from the obstacles are determined by the expression:

$$\begin{bmatrix} F_{rxi} \\ F_{rzi} \end{bmatrix} = -c \cdot e^{-\beta q_i} \begin{bmatrix} V_{pi} \cos(\alpha_i) \\ V_{pi} \sin(\alpha_i) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

where q_i is the distance between the moving object and the i -th obstacle; α_i is the orientation angle of the moving object in relation to the obstacle i -th obstacle; V_p is the projection of the relative velocity of the moving object and obstacle; c, β — are the repulsive force coefficients ($c > 0, \beta > 0$).

The orientation angle of the moving object with respect to the i -th obstacle is determined by the expression:

$$\alpha_i = \text{atan2}(z_{oi} - z_r, x_{oi} - x_r), \quad (13)$$

where x_{oi}, z_{oi} designate the coordinates of the i -th obstacle; atan2 is a function for calculating the tangent of an angle in the interval $-\pi < \alpha \leq \pi$.

The distance between the moving object and the i -th obstacle is determined by the expression:

$$d_i = \sqrt{(x_r - x_{oi})^2 + (z_r - z_{oi})^2}. \quad (14)$$

After calculating the attractive force of the MO to the target point and repulsive forces from obstacles and the boundaries of the working area, the components of the resultant force of the virtual field can be found by the formula:

$$\begin{bmatrix} F_{\Sigma x} \\ F_{\Sigma z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{ax} \\ F_{az} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_i F_{rxi} \\ \sum_i F_{rzi} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

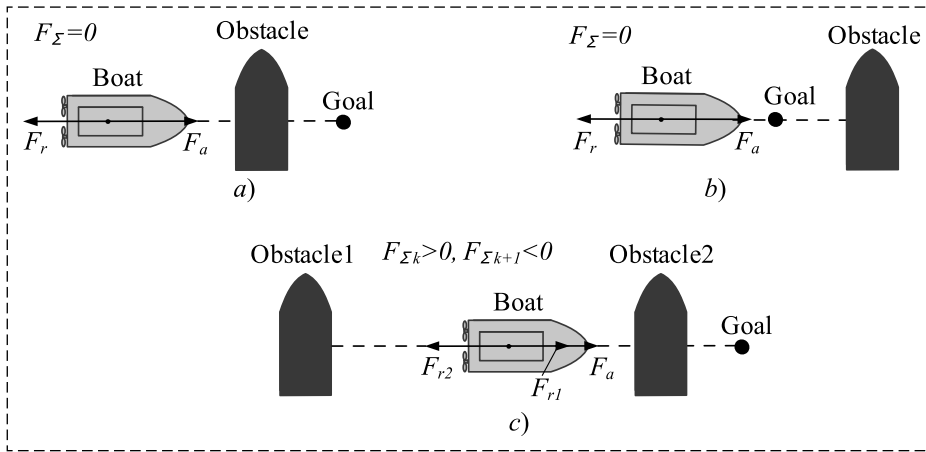


Fig. 6. Local minimum areas occurrence illustrated

The planned end point coordinates of the MO movement with the step determined by the expression:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r \\ z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{\Sigma x} \\ F_{\Sigma z} \end{bmatrix} \Delta t, \quad (16)$$

where Δt is the time step; x_p, z_p are the coordinates of the planned moving object trajectory.

As indicated above, one drawback of the potential field method is the possibility for a moving object to fall into the local minimum of the field. In the local minimum of the field, the configuration of the medium and the potential forces are such that the resultant force F is equal to zero at each time instant (fig. 6, a, b) or constantly changes its sign for the opposite (fig. 6, c).

Either does the moving object stop or reciprocate, but cannot move to the target point. The local minimum area of the potential field for the cases shown in fig. 6, a, b are determined with $F_{\Sigma} = 0$.

The situation presented in fig. 6, c can be diagnosed by analyzing the moving object direction. If the sign of the potential field resultant force F_{Σ} , projected onto the line, connects the moving object and the target point at k and $k + 1$ steps, it is reversed, which means the angle

$$\chi = \pi - \arccos \left(\frac{\langle \bar{F}_{\Sigma}(k) \cdot \bar{F}_{\Sigma}(k+1) \rangle}{|\bar{F}_{\Sigma}(k)| \cdot |\bar{F}_{\Sigma}(k+1)|} \right) \quad (17)$$

does not exceed some small value of ε , it is necessary to take additional steps to lead a moving object out of the field local minimum. Model experiments have established that with $\varepsilon \leq \pi/60$ this case is well diagnosed.

To solve the problem of getting the MO into the local field minimum, we use an approach based on the temporary replacement of the global target point with a virtual target [31].

If one of the virtual field local minimum areas is diagnosed, the virtual target point coordinates can be calculated in accordance with the expression:

$$\begin{bmatrix} x_{gv} \\ z_{gv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r \\ z_r \end{bmatrix} - H \sigma \begin{bmatrix} x_g \\ z_g \end{bmatrix}, \quad (18)$$

where x_{gv}, z_{gv} represent the virtual target point coordinates; σ — is the coefficient determined by the nature of the medium, the obstacles configuration and the distance between

the target point and the moving object ($\sigma < 1$); H — is the rotation matrix.

$$H = \begin{bmatrix} \cos(\xi) & \sin(\xi) \\ -\sin(\xi) & \cos(\xi) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

where ξ is the angle set randomly from $\pm\pi/2$.

The time t_z of the reverse substitution of the virtual target point for the global one is determined by the moving object dynamics and the operating environment state. It is necessary to choose t_z so that the moving object does not return to the potential field local minimum area. Thus, the placement of virtual targets allows organizing the movement of a moving object in complex environments.

Obstacle avoidance method based on unstable driving patterns. Such a bionic approach to circumventing obstacles does not require preliminary mapping, and thus reduces the requirements for the intellectual support of the vessel. The essence of the method is as follows: a bifurcation parameter β is introduced into the structure of the regulator, the value of which depends on the distance to the obstacle. If the distance from the unmanned boat to the obstacle is exceeds the tolerable distance R^* , the bifurcation parameter $\beta = 0$ and the closed-looped system are both in a stable state. In case this distance is less than tolerable R^* , $\beta \neq 0$ and the system becomes unstable. Since this instability is due to the distance to the obstacle, it is natural that the unstable state deviates the vessel from the trajectory on which the obstacle is located in order to increase this distance to the obstacle.

We define the bifurcation parameter in the following form [22]:

$$\beta = |R - R^*| - (R - R^*),$$

where R is the distance to the obstacle measured by the sensor, R^* is the allowable distance to the obstacle, i.e. the distance at which it is necessary to begin the procedure of divergence with an obstacle. $|\cdot|$ — modulus of number, i.e. its absolute value.

It is easy to show that if $R \geq R^*$, then $\beta = 0$, which means the value of the bifurcation parameter is zero, even if we found an obstacle, but the distance to it is even more acceptable. If $R < R^*$, then $\beta = -2(R - R^*)$. Taking into account that $(R - R^*) < 0$, $\beta > 0$.

As noted, the behavior of the system will be stable if the matrix $G = QT_2$ is positively defined. It follows that in order to bring the system into an unstable mode, one of the diagonal elements of the matrix T_2 must be made negative. We equate it to our bifurcation parameter, i.e. $T_2(1,1) = -\beta$.

The proposed controller operates as follows. The algorithm is executed until the vessel reaches the end point P_k . If an obstacle occurs on the vessel's route, and the obstacle is outside the danger zone, i.e. $R \geq R^*$ i.e. $\beta = 0$, then the usual terminal control is calculated by the formula (5). If the condition $R \geq R^*$ is not satisfied and $\beta \neq 0$, then the bifurcation parameter is calculated, and the vessel is put into an unstable mode.

Simulation and experiment results

To study the proposed methods, a mathematical model of the surface mini-motorboat "Sigul" was used. The actuators are two propulsion devices based on brushless asynchronous motors and a servo drive shown in fig. 5. Motors and screws are mounted on a movable frame and may deviate from the longitudinal axis by the same angle α (fig. 7). The motors and servo drive are controlled by local regulators, with a PWM signal being applied to their inputs. The inertia of the motors and servo can be neglected compared with the inertia of the object.

To study the synthesized regulator, we will use the following parameters:

- Weight $m = 50$ kg;
- Moments of inertia $J_y = 15.1$ kg / m²;
- Elements of the matrix of added masses $\lambda_{1,1} = 1.08$ kg, $\lambda_{3,3} = 11.43$ kg, $\lambda_{5,5} = 20$ kg;
- The initial position of the unmanned vessel $P_0 = [0, 0]$;
- Target point $P_k[45, 45]$;
- Terminal control time $T_k = 15$ sec;
- Maximum speed of the boat and moving obstacles $V_{\max} = 2$ m/s;

— The value of the functional matrices in equation (5 $M = \begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_z \end{bmatrix}$): $R = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$, $F'_d = \begin{bmatrix} -c_x V_x^2 \\ -c_z V_z^2 \end{bmatrix}$, $F'_v = 0$.

Sensors mounted on the vessel mast are three video cameras with a total view field of 135°. The cameras' software allows detecting objects on the water surface at a distance of 50 meters, determining their contours, sizes and distances from a crewless powerboat.

Figures 8, 9 demonstrate the results of the vessel movement modeling. Fig. 8 shows the boat movement of the through the environment with a single stationary obstacle, while fig. 9 displays the boat moving in an environment with two moving obstacles.

As can be seen from the modeling results in the control system, the trajectory of the vessel movement calculations were correct when passing obstacles. In all model experiments, the target point was reached within a set point in time with the boat speed being



Fig. 7. Propulsion and steering complex of the boat

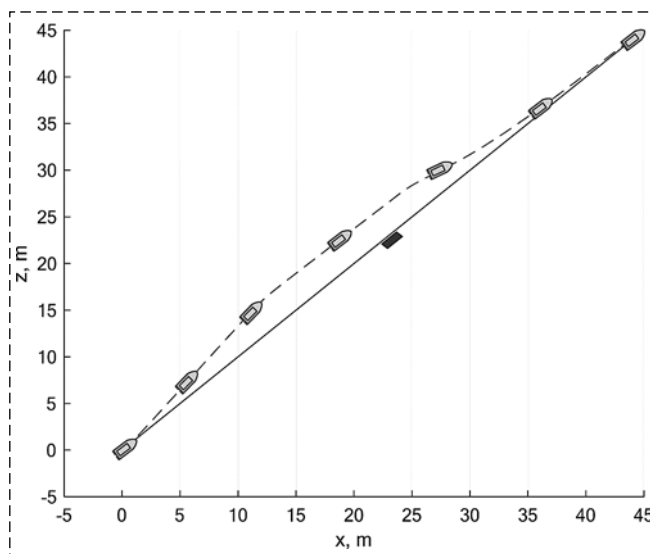


Fig. 8. Trajectory planning with a single stationary obstacle

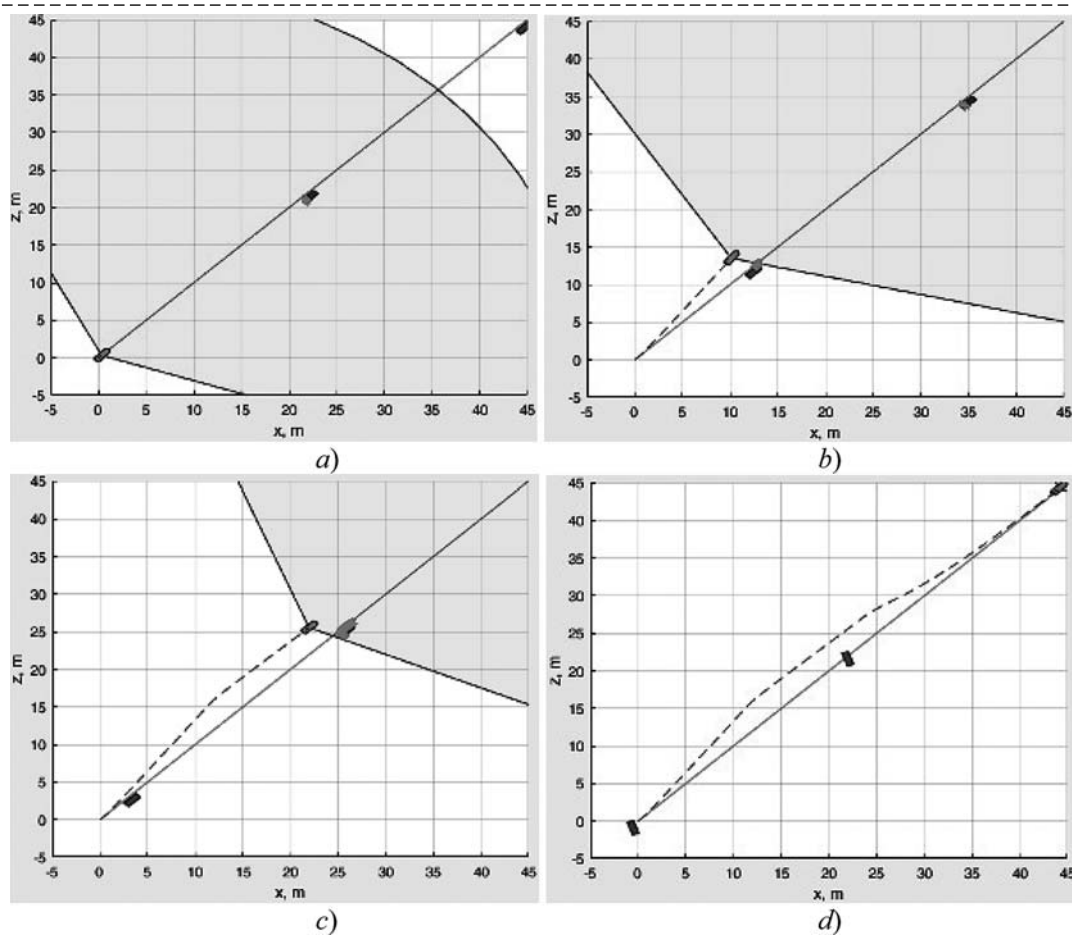


Fig. 9. Trajectory planning with two moving obstacles

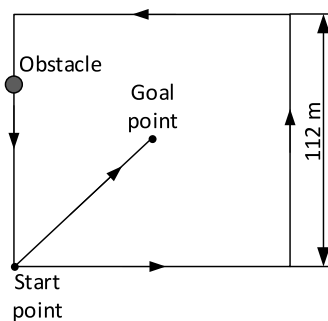


Fig. 10. Experiment results

equal to zero. The range of the repulsive forces of the virtual field corresponded to the range of the boat technical vision system. The minimum distance from the boat to the obstacle was 3 m.

To confirm the effectiveness of the approach, a full-scale experiment was conducted in the Taganrog Bay of the Azov Sea. The boat needed to sail offline on the sides of the square and finish in

its center as shown in fig. 10, and in 40 seconds. On one side of the square, an obstacle in the form of a floating buoy was situated. A screenshot from the shore control panel is shown in fig. 10, b.

As a result of the experiment, the boat completed the task for a specified time. The minimum distance to the obstacle was 4 m.

Conclusion

The paper presents algorithms for terminal control and scheduling for moving an unmanned boat in an environment with obstacles, based on the position-trajectory algorithm and a hybrid scheduling method based on virtual fields and unstable modes.

The novelty of the proposed approach lies in the method used to develop a local movement trajectory in the field with obstacles and in the hybridization of trajectory scheduling methods. This approach allows us to achieve a given safe distance when avoiding obstacles and virtually eliminate the chances of an emergency collision. The presented results can be used in systems of boats autonomous motion control and allow safe stationary and dynamic obstacles avoidance.

References

1. Hervas J. R., Reyhanoglu M., Hui Tang. Automatic landing control of Unmanned Aerial Vehicles on moving platforms, *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Istanbul, 2014, pp. 69–74, doi: 10.1109/ISIE.2014.6864588.
2. Suvorov A. N., Kuzmenkova L. A. Driving Tesla — to the future, *Scientific and methodical electronic journal "Concept"*, 2015, vol. 25, pp. 1–5, available at: <http://e-koncept.ru/2015/65303.htm>.
3. Erokhin A. V., Erokhin V. I. Methods and models of group self-control by the movement of a team of robots with simultaneous localization and construction of an obstacle map from data of scanning devices, *Izvestiya SPbSTU*, 2014, no. 27, pp. 88–100.
4. Dongshu W., Haitao W., Lei L. Unknown environment exploration of multi-robot system with the FORDPSO, *Swarm and Evolutionary Computation*, 2015.
5. Garrido S., Moreno L., Blanco D., Jurewicz P. Path planning for mobile robot navigation using Voronoi diagram and fast marching, *International Journal of Robotics and Automation*, 2011, vol. 2, iss. 1, pp. 42–64.
6. Mulyukha V. A., Guk M. Yu., Zaborovsky V. S. The system of supervisor network-centric management of robotic objects, *Robotics and Technical Cybernetics*, 2016, no. 3 (12), pp. 405–410.
7. Varlashin V. V., Ershova M. A., Bunyakov V. A., Shmakov O. U. Real-Time Surround-View System for Mobile Robotic System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 162–170 (in Russian), <https://doi.org/10.17587/mau.20.162-170>.
8. Pavlovsky V., Panchenko A., Orlov I. Control Algorithm for Walking Robot with Mosaic Body, *Proc. of the Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots*, Hangzhou, China, September 6–9, 2015, pp. 265–271.
9. Filaretov V. F., Yukhimets D. A. The Path Planning Method for AUV Group Moving in Environment with Obstacles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 356–365 (in Russian), <https://doi.org/10.17587/mau.21.356-365>.
10. Pshikhov V., Medvedev M., Gaiduk A., Belyaev V., Fedorenko R., Krukhmalev V. Position-trajectory control system for robot on base of airship, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2013, pp. 3590–3595.
11. Finaev V., Kobersy I., Kosenko E., Solovyev V., Zargaryan Y. Hybrid algorithm for the control of technical objects, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, no. 6, pp. 2335–2339.
12. Benbouabdallah K., Qi-dan Z. A Fuzzy Logic Behavior Controller for a Mobile Robot Path Planning in Multi-obstacles Environment, *Research J. of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, vol. 5(14), pp. 3835–3842.
13. Gaiduk A. R., Martjanov O. V., Medvedev M. Yu., Pshikhov V. K., Hamdan N., Farhood A. Neural Network Based Control System for Robots Group Operating in 2-d Uncertain Environment, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 8, pp. 470–479, <https://doi.org/10.17587/mau.21.470-479>.
14. Al-Jarrah R., Shahzad A., Roth H. Path Planning and Motion Coordination for Multi-Robots System Using Probabilistic Neuro-Fuzzy, *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, no. 10, pp. 46–51.
15. Nazarahari M., Khanmirza E., Doostie S. Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm, *Expert Systems with Applications*, 2019, vol. 115, pp. 106–120.
16. Benaziza W., Slimane N., Mallem A. Mobile Robot Trajectory Tracking Using Terminal Sliding Mode Control, *Proceedings of the 6th International Conference on Systems and Control*, University of Batna 2, Batna, Algeria, May 7–9, 2017.
17. Yiguang Hong, Guowu Yang, Daizhan Cheng, Sarah Spurgeon. A New Approach To Terminal Sliding Mode Control Design, *Asian Journal of Control*, June 2005, vol. 7, iss. 2, pp. 177–181.
18. Defeng He. Dual-mode Nonlinear MPC via Terminal Control Laws With Free-parameters, *IEEE/CAA Journal Of Automatica Sinica*, July 2017, vol. 4, no. 3, pp. 526–533.
19. Zuber I. E. Terminal output control for nonlinear non-stationary discrete systems, *Differential Equations and Control Processes*, 2004, no. 2.
20. Rasekhipour Y., Khajepour A., Chen S.-K., Litkouhi B. A Potential Field-Based Model Predictive Path-Planning Controller for Autonomous Road Vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 1255–1267.
21. Belogalov D., Finaev V., Medvedev M., Shapovalov I., Soloviev V. Decentralized Control of a Group of Robots Using Fuzzy Logic, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 9, pp. 2492–2498.
22. Pshikhov V., Medvedev M. Motion Planning and Control Using Bionic Approaches Based on Unstable Modes, *Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments*, 2017, pp. 239–280.
23. Pshikhov V. K., Medvedev M. Y., Fedorenko R. V., Gurenko B. V. Decentralized control algorithms of a group of vehicles in 2D space, *Proc. SPIE 10253, 2016 International Conference on Robotics and Machine Vision*, 2017, doi: 10.1117/12.2266499.
24. Pshikhov V., Medvedev M. Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes, *SPIRAS Proceedings*, 2018, vol. 60, no. 5, pp. 39–63.
25. Gurenko B., Fedorenko R., Shevchenko V. Research of autonomous surface vehicle control system, *2016 ACM International Conference Proceeding Series. 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, MECHATRONICS AND AUTOMATION, ICCMA 2016*, Barcelona, December, 07-11, 2016, pp. 131–135.
26. Barbashin E. A. Lyapunov Functions, Publisher Librokom, 2012.
27. Londhe P. S., Dhadekar D. D., Patre B. M., Waghmare L. M. Non-singular terminal sliding mode control for robust trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle, *2017 Indian Control Conference (ICC)*, 2017, pp. 443–449.
28. Li B., Xu Y., Liu Ch., Fan Sh., Xu W. Terminal navigation and control for docking an underactuated autonomous underwater vehicle, *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems*, 2015, pp. 25–30.
29. Khatib O. Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *Int. Journal of Robotics Research*, 1986, vol. 5, no. 1, pp. 90–98.
30. Platonov A. K., Kirilchenko A. A., Kolganov M. A. Method of potentials in the problem of routing: history and prospects, Moscow, KIAM after M. V. Keldysh, 2001, 32 p. (in Russian).
31. Nooraliei A., Mostafa S. Robot Path Planning Using Wave Expansion Approach Virtual Target, *2009 International Conference on Computer Technology and Development 1*, 2009, pp. 169–172.

XIV-я Всероссийская Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2021)



**27 сентября – 2 октября
2021 г.**

**с. Дивноморское, Геленджик,
Краснодарский край, Россия**

<https://niimvus.org.ru/>

ОРГАНИЗАТОРЫ И СПОНСОРЫ

- Российская академия наук
- Министерство науки и высшего образования РФ
- Южный научный центр РАН
- Научный совет по мехатронике и робототехнике РАН
- Академия навигации и управления движением
- ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
- Южный федеральный университет
- НИИ многопроцессорных вычислительных систем им. А.В. Каляева ЮФУ
- Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
- Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
- Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
- НИЦ суперЭВМ и нейрокомпьютеров
- Журнал «Известия РАН. Теория и системы управления»
- Журнал «Автоматика и телемеханика»
- Журнал «Мехатроника, автоматизация, управление»
- Журнал «Труды СПИИ РАН»
- Журнал «Известия ЮФУ. Технические науки»

ЦЕЛЬ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ

Обсуждение результатов фундаментальных и прикладных исследований в области процессов управления и их практического применения в различных сферах человеческой деятельности.

СОСТАВ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ

Мультиконференция включает **четыре локальные научно-технические конференции:**

- **Робототехника и мехатроника (РиМ-2021)**, председатель – академик Ф.Л. Черноушко
- **Управление в распределенных и сетевых системах (УРСС-2021)**, председатель – академик И.А. Каляев, сопредседатель – академик член-корр. РАН Д.А. Новиков
- **Управление транспортными системами (УТС-2021)**, председатель – член-корр. РАН В.М. Приходько

РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА (РиМ-2021)

Программный комитет

Ф.Л. Черноушко	академик (ИПМех РАН, Москва) – <i>председатель</i>
И.Л. Ермолов	проф. РАН (ИПМех РАН, Москва) – <i>учёный секретарь</i>
Е.С. Брискин	д.т.н. (ВолгГТУ, Волгоград)
Ю.В. Визильтер	проф. РАН (ГосНИИАС, Москва)
В.А. Глазунов	д.т.н. (ИМАШ РАН, Москва)
З.А. Годжаев	д.т.н. (ВИМ, Москва)
О.В. Даринцев	д.т.н. (ИМех УНЦ РАН, Уфа)
О.Г. Котиев	д.т.н. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)
А.В. Лопота	д.т.н. (ЦНИИ РТК, С.-Петербург)
В.М. Лохин	д.т.н. (МИРЭА, Москва)
А.Л. Ронжин	проф. РАН (СПИИ РАН, С.-Петербург)
И.В. Рубцов	к.т.н. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)
В.В. Серебрянный	к.т.н. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)
М.В. Сильников	член-корр. РАН (НПО «СМ», С.-Петербург)
В.Ф. Филаретов	д.т.н. (ИАПУ ДВО РАН, Владивосток)
Н.Б. Филимонов	д.т.н. (МГУ, Москва)
С.П. Хрипунов	д.т.н. (ФПИ, Москва)
С.Г. Цариченко	д.т.н. (НИИ Геодезия, Красноармейск)
А.Ф. Щербатюк	член-корр. РАН (ИПМТ ДВО РАН, Владивосток)
А.И. Якушенко	академик (С.-Петербург)
С.Ф. Яцун	д.т.н. (ЮЗГУ, Курск)

Направления работы

- Кинематика и динамика роботов и мехатронных систем
- Средства очувствления и навигации роботов
- Алгоритмы и системы управления роботов и мехатронных систем
- Планирование поведения роботов в недетерминированных средах
- Групповое управление роботов
- Безэкипажные машины и автономные наземные роботы
- Беспилотные летательные аппараты
- Роботы для ликвидации ЧС
- Роботизация в топливно-энергетическом комплексе
- Роботизация в сельскохозяйственном производстве
- Прикладные аспекты проектирования и применения роботов и мехатронных систем

Секретариат конференции РиМ-2021

119526, Москва, пр. Вернадского, 101, корп. 1, ИПМех РАН

Тел.: +7(495) 434-3547, факс: +7(499) 739-9531

E-mail: ermolov@ipmnet.ru

Ермолов Иван Леонидович, д.т.н., профессор РАН

**Подробная информация
о Мультиконференции размещена
на сайте <https://niimvus.org.ru/>**

А. А. Сергеев^{1, 2}, математик, аспирант, alxsrg95@gmail.com,

А. Б. Филимонов^{3, 4}, д-р техн. наук, проф., filimon_ab@mail.ru,

Н. Б. Филимонов^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,

¹ Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва,

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва,

³ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва,

⁴ Московский авиационный институт (НИУ), Москва

Управление автономной посадкой БПЛА самолетного типа на статическую и динамическую посадочные площадки по «гибким» кинематическим траекториям

В современном мире все большую популярность в качестве легких и недорогих инструментов как военного, так и гражданского применения находят беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного типа. Заключительным и одним из важнейших этапов полета данных БПЛА является посадка. В связи с этим задача автоматизации управления посадкой БПЛА в сложных метеорологических условиях становится все более актуальной. В ряде случаев для дозаправки и подзарядки БПЛА целесообразно использовать динамическую подвижную посадочную площадку (ППП) вместо традиционной статической (неподвижной) посадочной площадки (НПП). В данной работе рассматривается постановка и решение задачи управления терминальным посадочным маневром БПЛА как на НПП, так и на ППП, обеспечивающим его переход из текущего начального состояния в целевое терминальное состояние по «гибким» кинематическим траекториям. В качестве ППП рассматривается специальное устройство для «ловли» БПЛА, оборудованное на автомобиле.

Для решения задачи автоматической посадки БПЛА на НПП разработана математическая модель динамики его продольного движения с пространственной синхронизацией перемещений. Разработан и исследован алгоритм управления конечным вертикальным посадочным маневром БПЛА на НПП методом обратных задач динамики с использованием принципа «гибких» кинематических траекторий.

Для решения задачи автоматической посадки БПЛА на ППП разработана математическая модель динамики его пространственного движения с пространственной синхронизацией перемещений. Разработан и исследован алгоритм управления терминальным посадочным маневром БПЛА на ППП методом обратных задач динамики с использованием принципов «гибких» кинематических траекторий и наведения на точку прицеливания.

Разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющее анализировать выполнение посадочного маневра БПЛА. В среде MATLAB проведена компьютерная апробация разработанных алгоритмов на примере управления посадочными маневрами БПЛА «Aerosonde» в условиях различных ветровых возмущений.

Ключевые слова: посадочный маневр БПЛА, неподвижная посадочная площадка, подвижная посадочная платформа, синтез алгоритма управления, метод обратных задач динамики, принцип «гибких» кинематических траекторий

Введение

Во многих сферах жизнедеятельности человека широкое применение находят беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного типа как гражданского, так и военного назначения [1], имеющие ряд преимуществ по сравнению с БПЛА вертолетного типа: больший радиус действия, большее время полета, лучшие аэродинамические показатели, больший коэффициент полезной нагрузки. Они весьма популярны и эффективны в качестве легких и недорогих инструментов в удаленных

операциях поиска, спасения, мониторинга, аэрофотосъемки, инспекции, научных исследований, патрулирования, разведки и т.д. Поскольку неотъемлемым завершающим и одним из самых ответственных, сложных и напряженных этапов полета любых многоразовых летательных аппаратов является посадка, то все большую актуальность приобретает задача управления безаварийной посадкой БПЛА на определенную посадочную площадку в автоматическом режиме в сложных метеорологических условиях [2]. Успешное решение данной задачи во многом определяет такие важные



Рис. 1. Статическая посадочная площадка
Fig. 1. Static landing site

характеристики БПЛА, как гибкость, мобильность, маневренность, автономность, а также низкая вероятность повреждения и высокая кратность повторного применения.

К настоящему времени разработаны различные методы решения задачи управления посадкой БПЛА на предварительно выбранную и оборудованную статическую (неподвижную) посадочную площадку (НПП) в виде земельного участка или специально подготовленной искусственной взлетно-посадочной полосы (рис. 1). Здесь можно выделить методы управления на основе GPS; методы, использующие контроллеры с типовыми ПИД законами управления; методы управления на основе обратных задач динамики; методы линеаризации обратной связи; методы управления скользящим режимом; методы нечеткого и нейросетевого управления; методы, использующие техническое зрение (см., например, работы [3–11]).

В ряде случаев для периодической дозаправки и подзарядки БПЛА вместо НПП целесообразно

использовать динамическую (подвижную) посадочную площадку (ППП) в виде платформы со специальным улавливающим устройством (рис. 2). Такой площадкой может служить для БПЛА корабельного базирования выдвигающаяся за борт движущегося судна-носителя кран-балка [12], а для наземных БПЛА — посадочная платформа с натянутой улавливающей сеткой и устройством захвата, оборудованная на каком-либо автотранспортном средстве [13].

Задача автоматического управления посадкой БПЛА на ППП становится все более актуальной, поскольку ее решение позволяет сократить время заправки топливом и увеличить зону возможной заправки, что в результате позволяет увеличить дальность и продолжительность полета, расширить круг решаемых задач. Однако приемлемые методы решения данной задачи управления посадкой до сих пор отсутствуют. В настоящей работе предлагаются алгоритмы автоматической "мягкой" посадки БПЛА по "гибким" кинематическим траекториям на НПП и ППП, синтезированные методом обратных задач динамики.

Принцип "гибких" кинематических траекторий в задачах управления терминальными маневрами БПЛА

В теории и практике терминального управления подвижными объектами доминирует принцип "жестких" траекторий, реализующий на основе концепции "невозмущенного—возмущенного движения" Ляпунова—Летова программно-позиционную стратегию управления. Данная стратегия заключается в стабилизации заранее запланированной "жесткой" номиналь-

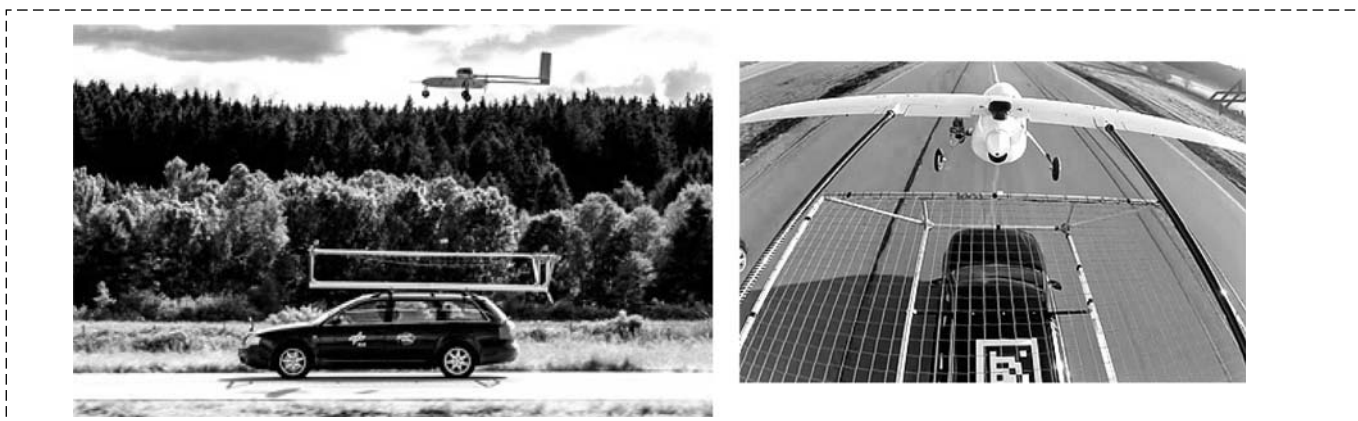


Рис. 2. Динамическая посадочная площадка
Fig. 2. Dynamical mobile landing site

ной программной траектории движения объекта, которая обеспечивает выполнение терминальной цели управления в "идеальных условиях" (при отсутствии возмущающих воздействий) движения. В последние годы все большую популярность приобретает принцип "гибких" траекторий, реализующий чисто программную стратегию управления [14] и заключающийся в отказе от привязки управляемого движения объекта к заранее запланированной номинальной траектории. Здесь в контур управления объекта включается механизм формирования так называемых "гибких", обновляемых (многократно пересчитываемых) с заданной периодичностью, более выгодных программных траекторий движения. Данные траектории обеспечивают выполнение терминальной цели управления объектом в "реальных условиях" (при наличии возмущающих воздействий) движения из состояний, соответствующих моментам времени их обновления. При этом рассчитываемый и исполняемый на каждом интервале обновления алгоритм программного управления является решением краевой задачи терминального управления "в большом" на основе исходной нелинейной модели динамики подвижного объекта. Согласно терминологии Н. Н. Моисеева, способ управления по принципу "жестких" траекторий именуется коррекцией по заданной программе, а способ управления по принципу "гибких" траекторий — коррекцией по конечному состоянию.

Следует отметить, что общепринятые модели движения БПЛА носят весьма общий характер и не учитывают главную специфику задач управления подвижными объектами — кинематику их движения в физическом пространстве. Дело в том, что распространенный традиционный способ планирования траекторий терминального управляемого движения БПЛА основан на задании желаемого кинематического закона движения в виде зависимости пространственных координат от времени:

$$\mathbf{r}(t), t = \overline{t_0, t_F}, \quad (1)$$

где $\mathbf{r} = (x_g, y_g, z_g)$ — вектор пространственных координат; t_0 и t_F — моменты времени начала и конца маневра соответственно. Данный формализм приводит к нестационарной постановке задачи управления и включению фактора времени t в разрабатываемые алгоритмы управле-

ния, вследствие чего процесс управления оказывается жестко привязанным к запланированному терминальному моменту времени t_F . Поскольку любая программа целенаправленного движения БПЛА носит кинематический характер, то в работах [14, 15] был предложен и получил развитие способ формализации траекторий движения аппарата, основанный на их представлении пространственной кривой в окружающем физическом пространстве в системе координат $O_g X_g Y_g Z_g$. В этом случае желаемую траекторию БПЛА можно задавать либо системой функциональных уравнений

$$\Phi_i(\mathbf{r}) = 0, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

либо параметризованной функцией

$$\mathbf{r}(\xi), \quad \xi = \overline{0, \xi_F}, \quad (3)$$

где в качестве параметра ξ целесообразно использовать одну из пространственных координат аппарата в системе координат $O_g X_g Y_g Z_g$. Следует подчеркнуть, что при задании траектории движения БПЛА в виде (1) реализуется ее так называемая "временная синхронизация", а в виде (2) и (3) — ее "пространственная синхронизация".

Таким образом, реализация принципа "гибких" траекторий возможна как на базе механизма временной, так и на базе механизма пространственной синхронизации управляемых движений. Второй способ кардинально меняет смысл задач управления: здесь процессы управления направлены на принуждение объекта двигаться по заданным пространственным кривым, именуемым далее "кинематическими траекториями".

Управление вертикальным посадочным маневром БПЛА на неподвижную посадочную площадку

Будем рассматривать БПЛА как динамический объект управления, для описания движения которого используется нормальная неподвижная система координат $O_g X_g Y_g Z_g$, связанная с Землей, и подвижная система координат $OXYZ$, связанная с летательным аппаратом (рис. 3).

Математическая модель динамики вертикального маневра БПЛА описывается следующей системой дифференциальных уравнений [16]:

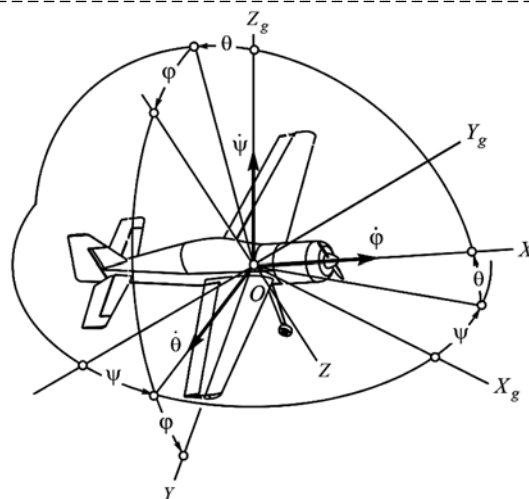


Рис. 3. Неподвижная и подвижная системы координат БПЛА
Fig. 3. Stationary and mobile systems of coordinates of UAV

$$\dot{H} = V \sin \vartheta; \quad (4)$$

$$\dot{L} = V \cos \vartheta; \quad (5)$$

$$\dot{V} = (n_x(\alpha) - \sin \vartheta)g; \quad (6)$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{(n_z(\alpha) - \cos \vartheta)g}{V}; \quad (7)$$

$$\dot{\theta} = q, \theta = \alpha + \vartheta; \quad (8)$$

$$\dot{q} = \frac{q_D \bar{c} S}{I_Y} (C_m(\alpha) + C_{m_q} \bar{c} q / V + C_{m_{\delta_B}} \delta_B). \quad (9)$$

Здесь приняты следующие обозначения: H , L — высота и дальность воздушного участка полета соответственно; V — путевая скорость; ϑ , α , θ — угол наклона траектории, угол атаки и угол тангажа соответственно; n_x , n_z — продольная и нормальная перегрузки соответственно; q — угловая скорость изменения тангажа; δ_B — угол отклонения руля высоты; C_m , C_{m_q} , $C_{m_{\delta_B}}$ — коэффициенты аэродинамического момента тангажа, продольного демпфирования и эффективности руля высоты соответственно; I_Y — момент инерции относительно поперечной оси; S , $\bar{c}$ — площадь крыла и средняя аэродинамическая хорда крыла соответственно; q_D — скоростной напор: $q_D = \rho V^2 / 2$ (ρ — плотность воздуха); $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

Отметим особенность математической модели (4)–(9) вертикального маневра БПЛА — это существенно нелинейная, многосвязная, нестационарная динамическая система шестого порядка с вектором состояния и управляющим воздействием вида

$$\mathbf{x} = (L, H, \dot{L}, \dot{H}, \theta, q), u = \delta_B,$$

функционирующая на конечном интервале времени $[t_0, t_F]$, где t_0 и t_F — моменты начала и окончания маневра соответственно.

Постановка задачи управления посадкой БПЛА. Задача управления посадочным маневром БПЛА заключается в синтезе программы отклонения руля высоты $\delta_B = \delta_B^*(t)$, обеспечивающей перевод летательного аппарата, описываемого моделью (4)–(9), из произвольно заданного начального состояния $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ в момент времени $t = t_0$:

$$\begin{aligned} L(t_0) = L_0, H(t_0) = H_0, \dot{L}(t_0) = \dot{L}_0, \\ \dot{H}(t_0) = \dot{H}_0, \theta(t_0) = \theta_0, q(t_0) = q_0 \end{aligned} \quad (10)$$

к терминальному моменту времени $t = t_F$ на заданную высоту H_F и дальность L_F , с заданным значением вертикальной скорости $\dot{H}_F$:

$$H(t_F) = H_F, L(t_F) = L_F, \dot{H}(t_F) = \dot{H}_F. \quad (11)$$

В большинстве традиционных постановок задач терминального управления фиксируется терминальный момент времени t_F . Однако для широкого круга реальных задач терминального управления подвижными объектами такое ограничение оказывается нецелесообразным или даже недопустимым с точки зрения безопасности управляемых движений. Поскольку данное ограничение нецелесообразно и для поставленной задачи управления посадочным маневром БПЛА, то ее решение будем строить с нефиксированным терминальным моментом времени t_F на основе принципа "гибких" траекторий с реализацией механизма пространствен-

ной синхронизации управляемых движений. В связи с этим полагаем, что желаемая траектория посадки БПЛА задана в виде зависимости высоты полета H от дальности $L \in [0, L_F]$:

$$H = H^*(\mathbf{x}_0, L), \quad (12)$$

где $\mathbf{x}_0$ — исходное состояние аппарата при $L = 0$, причем полагаем, что кривая (12) является достаточно гладкой. Управляющую программу БПЛА будем искать как функцию отклонения руля высоты δ_B от дальности полета L

$$\delta_B = \delta_B^*(\mathbf{x}_0, L), \quad (13)$$

обеспечивающую движение аппарата по желаемой кинематической траектории (12), удовлетворяющей заданным краевым условиям (10).

Модель пространственной синхронизации движения БПЛА в вертикальной плоскости получаем путем исключения времени t из его исходной модели (4)—(9), принимая дальность L в качестве новой независимой переменной. С этой целью поделим каждое из уравнений (4), (6)—(9) на уравнение (5):

$$\frac{dH}{dL} = \operatorname{tg} \vartheta; \quad (14)$$

$$\frac{dV}{dL} = \frac{(n_x(\alpha) - \sin \vartheta)g}{V \cos \vartheta}; \quad (15)$$

$$\frac{d\vartheta}{dL} = \frac{(n_z(\alpha) - \cos \vartheta)g}{V^2 \cos \vartheta}; \quad (16)$$

$$\frac{d\theta}{dL} = \frac{q}{V \cos \vartheta}, \quad \theta = \alpha + \vartheta; \quad (17)$$

$$\frac{dq}{dL} = \frac{q_D \bar{c} S}{I_Y V \cos \vartheta} (C_m(\alpha) + C_{m_q} \bar{c} q / V + C_{m_{\delta_B}} \delta_B). \quad (18)$$

Основная трудность решения задачи терминального управления БПЛА, описываемого моделью (14)—(18), обусловлена ее двухточечным, краевым характером, выраженным условиями (10), (11). Весьма эффективный подход к преодолению этой проблемы основан на использовании метода обратных задач динамики [17], который заключается в задании сначала желаемого программного движения объекта, удовлетворяющего заданным краевым условиям, а затем в определении управления, реализующего это движение в силу динамики объекта. Найдем управляющее воздействие на БПЛА, обеспечивающее желаемые кинема-

тические траектории посадки БПЛА в классе квазимногочленных функций в виде зависимости высоты полета H от протяженности посадочного маневра $L \in [0, L_F]$:

$$H^*(L) = (H_0^* - H_F^*) \exp(-\lambda \tilde{L}) \times \\ \times (1 + a_{H_1} \tilde{L} + a_{H_2} \tilde{L}^2)(1 - \tilde{L}) + H_F^*, \quad (19)$$

где

$$H^*(0) = H_0^*; \quad H^*(L_F) = H_F^*; \quad \lambda = 3/4; \quad \tilde{L} = \frac{L}{L_F};$$

$$a_{H_1} = \left. \frac{dH^*}{dL} \right|_{L=0} = \operatorname{tg} \vartheta_0^*; \quad a_{H_2} = \left. \frac{dH^*}{dL} \right|_{L=L_F} = \frac{\dot{H}_F^*}{V_F^*}.$$

Алгоритм управления посадкой БПЛА на НПП. Для решения рассматриваемой задачи управления вертикальным посадочным маневром БПЛА по "гибким" кинематическим траекториям (19) разработан следующий алгоритм [18], основанный на методе обратных задач динамики:

Шаг 1. Задание начальных и конечных параметров посадочного маневра БПЛА: $H_0, H_F, L_F, V_0, V_F, \dot{H}_F, \vartheta_0$.

Шаг 2. Расчет кинематической траектории посадки $H^*(\mathbf{x}, L)$ удовлетворяющей граничным условиям (10), (11) посадочного маневра БПЛА согласно (19).

Шаг 3. Расчет программы изменения угла наклона траектории $\vartheta = \vartheta^*(\mathbf{x}, L)$ по рассчитанной программе $H^*(\mathbf{x}, L)$ согласно (14).

Шаг 4. Расчет программы изменения скорости $V = V^*(\mathbf{x}, L)$ и угла атаки $\alpha = \alpha^*(\mathbf{x}, L)$ по рассчитанным программам $H^*(\mathbf{x}, L)$ и $\vartheta^*(\mathbf{x}, L)$ согласно (15), (16).

Шаг 5. Расчет программы изменения угла тангажа $\theta = \theta^*(\mathbf{x}, L)$ и угловой скорости $q = q^*(\mathbf{x}, L)$ по рассчитанным программам $V, \alpha^*(\mathbf{x}, L)$ согласно (17).

Шаг 6. Расчет искомой управляющей программы изменения руля высоты $\delta_B = \delta_B^*(\mathbf{x}, L)$ по рассчитанным программам $H^*(\mathbf{x}, L), \vartheta^*(\mathbf{x}, L), V^*(\mathbf{x}, L), \alpha^*(\mathbf{x}, L), \theta = \theta^*(\mathbf{x}, L), q = q^*(\mathbf{x}, L)$ согласно (18).

В данном алгоритме реализация стратегии "гибких" кинематических траекторий осуществляется заменой начального состояния $\mathbf{x}_0$ на текущее $\mathbf{x}$:

$$H = H^*(\mathbf{x}, L) \Rightarrow \delta_B = \delta_B^*(\mathbf{x}, L),$$

в результате чего найденный алгоритм программно-позиционного управления реализует механизм обратной связи.

Синтезированный алгоритм реализован в системе MATLAB и апробирован на примере посадочного терминального маневра маломерного БПЛА "Aerosonde" [19, 20], основные параметры (весовые, инерционные, геометрические и аэродинамические) которого представлены ниже:

$$\begin{aligned} m &= 13,5 \text{ кг}; S = 0,55 \text{ м}^2; \bar{c} = 0,19 \text{ м}; \\ b &= 2,9 \text{ м}; I_X = 0,824 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\ I_Y &= 1,135 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; I_Z = 1,179 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\ I_{XZ} &= 0,120 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \\ C_{L_0} &= 0,23; C_{Y_0} = 0; C_{D_0} = 0,0434; \\ C_{L_\alpha} &= 5,616 \text{ 1/рад}; C_{Y_\beta} = -0,83 \text{ 1/рад}; \\ C_{D_q} &= 0; C_{L_q} = 7,95 \text{ с/рад}; C_{Y_r} = 0; \\ C_{D_{\delta_B}} &= 0,013 \text{ 1/рад}; C_{L_{\delta_B}} = 0,13 \text{ 1/рад}; \\ C_{Y_p} &= 0; C_{n_0} = 0; C_{l_0} = 0; \\ C_{Y_{\delta_\alpha}} &= -0,075 \text{ 1/рад}; C_{n_p} = 0,0726 \text{ 1/рад}; \\ C_{l_{\beta}} &= -0,13 \text{ 1/рад}; C_{Y_{\delta_H}} = 0,1914 \text{ 1/рад}; \\ C_{n_p} &= -0,069 \text{ с/рад}; C_{l_p} = -0,5 \text{ с/рад}; \\ C_{m_0} &= 0,135; C_{n_r} = -0,0946 \text{ с/рад}; \\ C_{l_r} &= 0,25; C_{m_\alpha} = -2,73 \text{ 1/рад}; \\ C_{n_{\delta_\alpha}} &= 0,0108 \text{ 1/рад}; C_{l_{\delta_\alpha}} = -0,075 \text{ 1/рад}; \\ C_{m_q} &= -38,2 \text{ с/рад}; \\ C_{n_{\delta_H}} &= -0,693 \text{ 1/рад}; C_{l_{\delta_H}} = 0,0024 \text{ 1/рад}; \\ C_{m_{\delta_B}} &= -0,999 \text{ 1/рад}. \end{aligned}$$

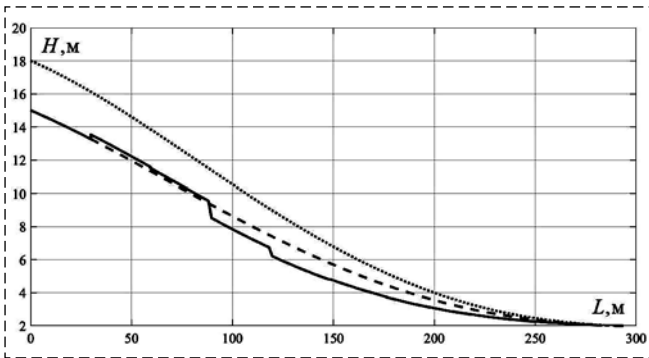


Рис. 4. Графики кинематических траекторий $H(L)$
Fig. 4. Graphs of the kinematic trajectories $H(L)$

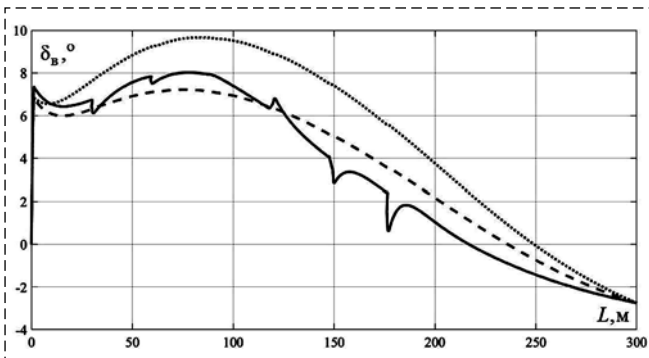


Рис. 5. Графики отклонений угла руля высоты $\delta_B(L)$
Fig. 5. Graphs of the deviations of the elevator $\delta_B(L)$

На основе разработанного программного обеспечения проведен анализ эффективности синтезированного алгоритма управления посадочным маневром БПЛА "Aerosonde". На рис. 4, 5 приведены графики "гибких" кинематических траекторий $H(L)$ и отклонений угла руля высоты $\delta_B(L)$ для следующих начальных и терминальных значений высоты, дальности и скорости полета:

$$\begin{aligned} L_0 &= 0 \text{ м}, H_{10} = 15 \text{ м}, H_{20} = 18 \text{ м}, V_0 = 25 \text{ м/с}, \\ L_F &= 300 \text{ м}, H_F = 2 \text{ м}, V_F = 20 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

На рис. 4, 5 приняты следующие обозначения: сплошная линия — посадка с высоты H_{10} без возмущений; штриховая линия — посадка с высоты H_{10} с постоянным ветровым возмущением; пунктирная линия — посадка с высоты H_{20} без возмущений.

Апробация синтезированного алгоритма показала высокое качество посадочного маневра БПЛА с выполнением необходимых требований.

Управление пространственным посадочным маневром БПЛА на движущуюся посадочную площадку

Задача управления посадкой БПЛА на ППП является более сложной, чем рассмотренная выше задача управления посадкой на НПП. Рассмотрим возможность распространения изложенного метода решения задачи управления посадкой БПЛА на НПП на случай автономной посадки на ППП, оборудованную на каком-либо автотранспортном средстве (АТС).

Будем рассматривать БПЛА как объект управления, модель динамики пространственного движения которого описывается следующей системой дифференциальных уравнений [21]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_g &= u \cos \theta \cos \psi + \\ &+ v(\sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi) + \\ &+ w(\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) + W_x, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_g &= u \cos \theta \sin \psi + \\ &+ v(\sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi) + \\ &+ w(\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) + W_y; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_g &= -u \sin \theta + v \sin \phi \cos \theta + \\ &+ w \cos \phi \cos \theta + W_z; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\dot{u} = rv - qw - g \sin \theta + \frac{q_D S C_D}{m} + \frac{P}{m}; \quad (23)$$

$$\dot{v} = pw - ru + g \cos \theta \sin \varphi + \frac{q_D S C_Y}{m}; \quad (24)$$

$$\dot{w} = qu - pv + g \cos \theta \cos \varphi + \frac{q_D S C_L}{m}; \quad (25)$$

$$\dot{p} = \frac{I_Y - I_Z}{I_X} qr + \frac{I_{XZ}}{I_X} (\dot{r} + pq) + \frac{q_D S b}{I_X} C_l; \quad (26)$$

$$\dot{q} = \frac{I_Z - I_X}{I_Y} pr + \frac{I_{XZ}}{I_Y} (r^2 - p^2) + \frac{q_D S \bar{c}}{I_Y} C_m; \quad (27)$$

$$\dot{r} = \frac{I_Z - I_X}{I_Z} pq + \frac{I_{XZ}}{I_Z} (\dot{p} - qr) + \frac{q_D S b}{I_Z} C_n; \quad (28)$$

$$\dot{\varphi} = p + q \sin \varphi \tan \theta + r \cos \varphi \tan \theta; \quad (29)$$

$$\dot{\theta} = q \cos \varphi - r \sin \varphi; \quad (30)$$

$$\dot{\psi} = q \sin \varphi \sec \theta + r \cos \varphi \sec \theta; \quad (31)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{w}{u}\right), \beta = \arcsin\left(\frac{v}{V}\right); \quad (32)$$

$$C_L = C_{L_0} + C_{L_\alpha} \alpha + C_{L_q} \bar{c} q / 2V + C_{L_{\delta_B}} \delta_B;$$

$$C_D = C_{D_0} + S / \pi b^2 * (C_L)^2 + \\ + C_{D_q} \bar{c} q / 2V + C_{D_{\delta_B}} \delta_B;$$

$$C_m = C_{m_0} + C_{m_\alpha} \alpha + C_{m_q} \bar{c} q / 2V + C_{m_{\delta_B}} \delta_B;$$

$$C_Y = C_{Y_0} + C_{Y_\beta} \beta + C_{Y_p} b p / 2V + \\ + C_{Y_r} b r / 2V + C_{Y_{\delta_\Delta}} \delta_\Delta + C_{Y_{\delta_H}} \delta_H;$$

$$C_l = C_{l_0} + C_{l_\beta} \beta + C_{l_p} b p / 2V + \\ + C_{l_r} b r / 2V + C_{l_{\delta_\Delta}} \delta_\Delta + C_{l_{\delta_H}} \delta_H;$$

$$C_n = C_{n_0} + C_{n_\beta} \beta + C_{n_p} b p / 2V + \\ + C_{n_r} b r / 2V + C_{n_{\delta_\Delta}} \delta_\Delta + C_{n_{\delta_H}} \delta_H.$$

Здесь x_g, y_g, z_g — координаты аппарата относительно Земной системы координат $O_g X_g Y_g Z_g$; $V_g = \sqrt{\dot{x}_g^2 + \dot{y}_g^2 + \dot{z}_g^2}$ — путевая скорость; u, v, w — скорости в связанной системе координат $OXYZ$; W_x, W_y, W_z — проекции скорости ветра в системе координат $O_g X_g Y_g Z_g$; θ, φ, ψ и p, q, r — углы тангажа, крена, рысканья и их угловые скорости соответственно; P — сила тяги двигателей; $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ — воздушная скорость; I_X, I_Y, I_Z, I_{XZ} — моменты инерции относительно главных осей; $S, \bar{c}, b$ — площадь крыла, средняя аэродинамическая хорда крыла и размах крыла соответственно; α и β — угол атаки и угол скольжения соответственно; C_D, C_Y, C_L — аэродинамические коэффициенты сил, а C_l, C_m, C_n — аэродинамические коэффициенты моментов; q_D — скоростной напор ($q_D = 0,5 \rho_v V^2$, $\rho_v = 1,225 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха); $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

В качестве вектора состояния БПЛА будем рассматривать вектор вида

$$\mathbf{x} = (x_g, y_g, z_g, \dot{x}_g, \dot{y}_g, \dot{z}_g, \theta, \varphi, \psi, p, q, r),$$

а в качестве его управляющих переменных — вектор

$$\mathbf{u} = (\delta_B, \delta_H, \delta_\Delta, P),$$

где $\delta_B, \delta_H, \delta_\Delta$ — углы отклонения рулей высоты, направления и крена (элеронов) соответственно.

Будем рассматривать ППП в виде горизонтальной посадочной улавливающей сети, оборудованной на крыше микроавтобуса. При этом для безопасности посадочного маневра аппарата выбирается прямолинейный горизонтальный участок местности протяженностью $x_{\max}$, неровности которого могут быть компенсированы подвесками платформы и АТС. Полагаем,

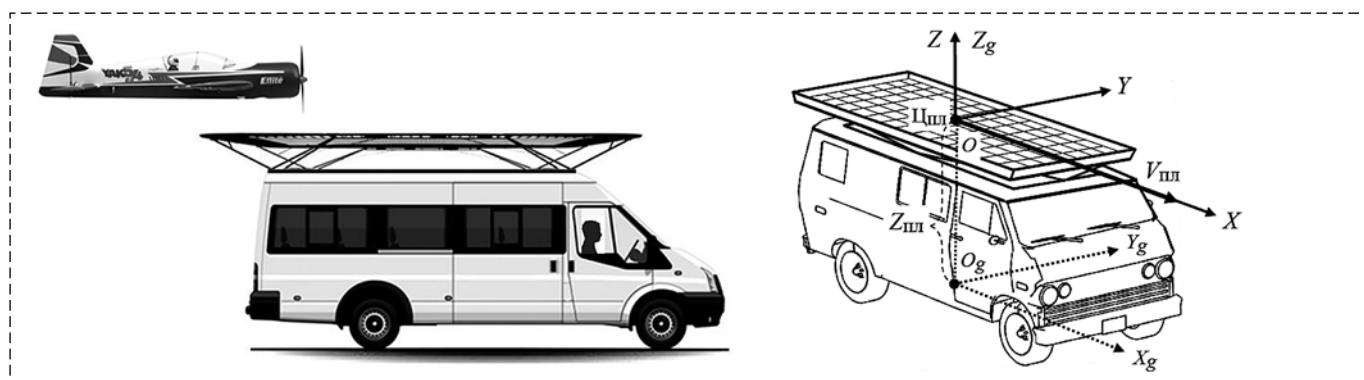


Рис. 6. Неподвижная и подвижная система координат АТС

Fig. 6. Stationary and mobile systems of coordinates of MLS

что АТС не маневрирует, двигаясь прямолинейно и равномерно, а посадочная траектория БПЛА имеет малое боковое отклонение от вертикальной плоскости, в которой расположена траектория движения АТС ($y_g \ll z_g \ll x_{\text{ман}}$). Для описания движения ППП используется связанная с Землей нормальная неподвижная система координат $O_g X_g Y_g Z_g$ и связанная с АТС подвижная система координат $OXYZ$ (рис. 6). Модель динамики движения ППП описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}_{\text{пл}} = V_{\text{пл}}, \quad (33)$$

$$\dot{y}_{\text{пл}} = 0, \quad \dot{z}_{\text{пл}} = 0, \quad (34)$$

где $x_{\text{пл}}$, $y_{\text{пл}}$, $z_{\text{пл}}$ и $V_{\text{пл}}$ — соответственно координаты и скорость движения платформы, определяющие ее вектор состояния:

$$\mathbf{x}_{\text{пл}} = (x_{\text{пл}}, y_{\text{пл}}, z_{\text{пл}}, V_{\text{пл}}).$$

Постановка задачи управления посадкой БПЛА на ППП. Задача управления посадочным маневром БПЛА на ППП заключается в синтезе программ отклонений рулей высоты, направления, крена и изменения тяги:

$$\delta_v = \delta_v^*(t), \delta_\vartheta = \delta_\vartheta^*(t), \delta_\eta = \delta_\eta^*(t), P = P^*(t),$$

обеспечивающих перевод летательного аппарата, описываемого моделью (20)—(32) из произвольно заданного начального состояния $\mathbf{x}_0$ в момент времени $t = t_0$ в конечное состояние $\mathbf{x}_F$ в терминальный момент времени $t = t_F$, с допустимым терминальным промахом в момент сближения аппарата с ППП, описываемой моделью (33), (34):

$$|x_{gF} - x_{\text{пл}F}| \leq \varepsilon_x^*, \quad (35a)$$

$$|y_{gF} - y_{\text{пл}F}| \leq \varepsilon_y^*, |z_{gF} - z_{\text{пл}F}| \leq \varepsilon_z^*, \quad (35b)$$

$$|V_{gF} - V_{\text{пл}F}| \leq \varepsilon_V^*,$$

где $x_{\text{пл}F}$, $y_{\text{пл}F}$, $z_{\text{пл}F}$, $V_{\text{пл}F}$ — конечные значения переменных состояния платформы; ε_x^* , ε_y^* , ε_z^* , ε_V^* — предельно допустимые значения компонент вектора терминального промаха БПЛА: $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_V)$.

Приведем решение поставленной задачи управления посадкой БПЛА методом обратных задач динамики с использованием принципов "гибких" кинематических траекторий и наведения в целевую точку.

Принцип "гибких" кинематических траекторий. Следуя данному принципу, кинематические траектории посадочного маневра БПЛА будем конструировать в классе квазимного-членных функций:

$$z^*(x) = (z_0 - z_f) \exp(-\lambda_z x') \times (1 + a_{z_1} x' + a_{z_2} x'^2)(1 - x') + z_f, \quad (36)$$

$$y^*(x) = (y_0 - y_f) \exp(-\lambda_y x') \times (1 + a_{y_1} x' + a_{y_2} x'^2)(1 - x') + y_f, \quad (37)$$

$$x' = \frac{x - x_0}{x_f - x_0},$$

где переменные x_0 , y_0 , z_0 и x_f , y_f , z_f — координаты начала и окончания посадочного маневра летательного аппарата соответственно. Здесь параметры λ_y , λ_z задаются, а коэффициенты a_{z_1} , a_{z_2} , a_{y_1} , a_{y_2} определяются начальным и конечным состояниями БПЛА из следующей системы уравнений:

$$\left. \frac{dz^*}{dx} \right|_{x=0} = \text{tg} \vartheta_0, \quad \left. \frac{dz^*}{dx} \right|_{x=x_f} = \text{tg} \vartheta_f,$$

$$\left. \frac{dy^*}{dx} \right|_{x=0} = \text{tg} \xi_0, \quad \left. \frac{dy^*}{dx} \right|_{x=x_f} = \text{tg} \xi_f.$$

Для "мягкой" посадки БПЛА на ППП его путевая скорость V_g должна плавно снижаться до скорости платформы $V_{\text{пл}}$ ($V_g \geq V_{\text{пл}}$):

$$V_g^*(x) = V_{g_0} + (V_{\text{пл}} - V_{g_0}) \frac{x - x_0}{x_f - x_0}. \quad (38)$$

Поскольку траектории и скорость посадочного маневра БПЛА (36)—(38) являются функциями пространственной переменной x , а уравнения его движения (20)—(32) — функцией временной переменной t , то для взаимосвязи между этими переменными можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy/dt}{dx/dt} = \frac{\dot{y}_g}{\dot{x}_g}, \quad \frac{dz}{dx} = \frac{dz/dt}{dx/dt} = \frac{\dot{z}_g}{\dot{x}_g}, \quad (39)$$

$$V_g^2 = \dot{x}_g^2 + \dot{y}_g^2 + \dot{z}_g^2.$$

Принцип наведения в целевую точку. Для расчета координаты x_F , т.е. целевой точки встречи БПЛА с ППП, используется принцип наведения в целевую точку, реализующий метод "погони с упреждением" [22]. Согласно данному принципу строится траектория посадочного маневра летательного аппарата, обеспечиваю-

шая его приведение в терминальный момент времени $t = t_F$ в заданную окрестность $\varepsilon^* = (\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \varepsilon_z^*, \varepsilon_V^*)$ целевой точки встречи с платформой, определяемую допустимым терминальным промахом (16). Уменьшение данного промаха достигается расчетом планируемой целевой точки встречи БПЛА и ППП в каждый момент времени обновления "гибкой" посадочной кинематической траектории посадки. Для этого на основе рассчитанных программных посадочных траекторий $z^*(x)$, $y^*(x)$, программы $V_g^*(x)$ и соотношений (39) вычисляются планируемые терминальное время посадочного маневра t_F и координата ППП $x_{плF}$:

$$x_{плF} = x_{пл0} + V_{пл} t_F. \quad (40)$$

Затем на основе сравнения терминальных значений координат БПЛА x_F и ППП $x_{плF}$ проводится выбор целевого конечного состояния аппарата $\mathbf{x}_{пл}$:

- если выполняется условие (35а), то выбираются рассчитанные конечные вектор состояния $\mathbf{x}_F$, посадочные траектории $z^*(x)$, $y^*(x)$ и программа $V_g^*(x)$ беспилотника;
- если не выполняется условие (35а), то конечной координате беспилотника x_F присваивается значение конечной координаты платформы $x_{плF}$ (40) и проводится пересчет целевого конечного вектора состояния $\mathbf{x}_F$.

Таким образом, в основу принципа наведения в целевую точку x_F встречи БПЛА с ППП положено выполнение условия терминального промаха (35а).

Алгоритм управления посадкой БПЛА на ППП. Для решения рассматриваемой задачи управления посадкой БПЛА по "гибким" кинематическим траекториям (36), (37) разработан следующий алгоритм [23], основанный методе обратных задач динамики:

Шаг 1. Задание начального и терминального состояний

1.1. Задание начальных состояний БПЛА $\mathbf{x}_0$ и ППП $\mathbf{x}_{пл0}$.

1.2. Задание конечных координат x_F , y_F , z_F и скорости V_{gF} БПЛА:

$$x_F = (x_{\max} - x_{пл0})/2,$$

$$y_F = y_{плF}, \quad z_F = z_{плF}, \quad V_{gF} = V_{пл}.$$

1.3. Задание шага временной сетки Δt .

Шаг 2. Поиск координаты целевой точки встречи x_F и расчет программных посадочных траекторий $z^*(x)$, $y^*(x)$

2.1. Задание номера итерации $k = 1$.

2.2. Ввод значения $i = 0$.

2.3. Расчет x_{i+1} по x_i , $\dot{x}_{g_i}$: $x_{i+1} = x_i + \dot{x}_{g_i} \Delta t$.

2.4. Если $x_{i+1} \leq x_F$, переход к шагу 2.4.1, иначе переход к шагу 2.4.2.

2.4.1. Расчет y_{i+1} , z_{i+1} , полагая $x = x_{i+1}$ в (36), (37), и переход к шагу 2.9.

2.4.2. Расчет t_F : $t_F = \Delta t \cdot i$ и переход к шагу 2.5.

2.5. Расчет $x_{плF}$ по t_F согласно (40).

2.6. Если выполнено неравенство (35а) при $x_{gF} = x_i$, переход к шагу 2.7, иначе переход к шагу 2.6.1.

2.6.1. Задание $x_F = x_{плF}$, $k = k + 1$ и переход к шагу 2.2.

2.7. Если выполнено неравенство (35б) при $y_{gF} = y_i$, $z_{gF} = z_i$, $V_{gF} = V_{g_i}$, переход к шагу 3, иначе переход к шагу 2.8.

2.7.1. Если $k \leq k_{\max}$ переход к шагу 2.6.1, иначе прекращение вычисления и прерывание посадочного маневра БПЛА из-за его невыполнимости для заданных начальных и конечных условий.

2.8. Расчет $V_{g_{i+1}}$ при $x = x_{i+1}$ согласно (38).

2.9. Расчет $\dot{x}_{g_{i+1}}$, $\dot{y}_{g_{i+1}}$, $\dot{z}_{g_{i+1}}$ при $V_g = V_{g_{i+1}}$, $dx = x_{i+1} - x_i$, $dy = y_{i+1} - y_i$, $dz = z_{i+1} - z_i$, $dt = \Delta t$ согласно (39).

2.10. Задание θ_i , ϕ_i , ψ_i : $\theta_i \in [2^\circ, 4^\circ]$, $\phi_i = 0$, $\psi_i = \arctg((y_{i+1} - y_i)/(x_{i+1} - x_i))$.

2.11. Положить $i = i + 1$ и перейти к шагу 2.3.

Шаг 3. Расчет искомых управляющих программ δ_B^* , δ_Δ^* , δ_H^* , P^* (расчеты, связанные с использованием решений дифференциальных уравнений (20)—(32), проводятся по соответствующим конечно-разностным аналогам Эйлера).

3.1. Ввод значения $j = 0$.

3.2. Если $x_j < x_F$ переход к шагу 3.3, иначе прекращение вычисления в связи с найденными искомыми управляющими программами.

3.3. Согласно разностным аналогам уравнений (20)—(22) расчет u_{j+1} , v_{j+1} , w_{j+1} по x_{j+2} , x_{j+1} , y_{j+2} , y_{j+1} , z_{j+2} , z_{j+1} .

3.4. Согласно разностным аналогам уравнений (29)—(31) расчет p_{j+1} , q_{j+1} , r_{j+1} по θ_{j+2} , θ_{j+1} , ϕ_{j+2} , ϕ_{j+1} , ψ_{j+2} , ψ_{j+1} .

3.5. Согласно разностным аналогам уравнений (23)—(28) расчет δ_{Bj}^* , $\delta_{\Delta j}^*$, δ_{Hj}^* , P_j^* по u_{j+1} , u_j , v_{j+1} , v_j , w_{j+1} , w_j , p_{j+1} , p_j , q_{j+1} , q_j , r_{j+1} , r_j .

3.6. Ввод значения $j = j + 1$ и переход к шагу 3.2.

Следует отметить, что синтезированные на основе приведенного алгоритма программные управляющие воздействия δ_v^* , δ_n^* , δ_z^* , P^* реализуют разомкнутое управление посадкой БПЛА на ППП. Однако проведя замену начальных состояний x_0 и ППП $x_{пл0}$ на текущие x , $x_{пл}$ и учитывая, что современные быстродействующие бортовые ЦВМ позволяют формировать "гибкие" посадочные траектории на каждом шаге квантования времени Δt , можно заключить, что данные программные стратегии управления реализуют механизм обратной связи.

Для апробации разработанного алгоритма было проведено компьютерное моделирование посадочного маневра на БПЛА "Aerosonde" на ППП. Моделирование выполняли в среде MATLAB с использованием разработанного программного обеспечения. Анализ эффективности алгоритма проводили для посадочного маневра БПЛА с высоты $z_0 = 15$ м на ППП, находящуюся на высоте $z_{пл} = 2$ м над землей и движущуюся со скоростью $V_{пл} = 20$ м/с. Рассматривали различные начальные скорости беспилотника V_{g_0} ($V_1 = 25$ м/с и $V_2 = 28$ м/с) и начальные положения платформы $x_{пл0}$ ($r_1 = 30$ м и $r_2 = 50$ м) при отсутствии (W_1) и при на-

личии гармонического (W_2) и постоянного (W_3) ветровых возмущений. В момент обновления посадочной кинематической траектории БПЛА задавалось случайное возмущение его состояния, а также состояния ППП. На рис. 7–10 представлены результаты компьютерного моделирования посадки: графики посадочных траекторий $z(t)$ (рис. 7) и $z(x)$ (рис. 8); графики изменения целевой точки $x_F(x)$ (рис. 9); графики управляющих воздействий руля высоты $\delta_v(x)$ (рис. 10). На графиках сплошная линия соответствует посадке с начальной скоростью V_1 для начального положения платформы r_1 , с ветровым возмущением W_3 ; штриховая линия соответствует посадке с параметрами V_2 , r_2 , W_2 ; пунктирная линия — посадке с параметрами V_1 , r_1 , W_1 .

Заключение

Поставлены и решены актуальные задачи синтеза алгоритма управления посадочным терминальным маневром БПЛА на неподвижную посадочную площадку и движущуюся посадочную платформу. Разработаны и апробированы в среде MATLAB соответствующие

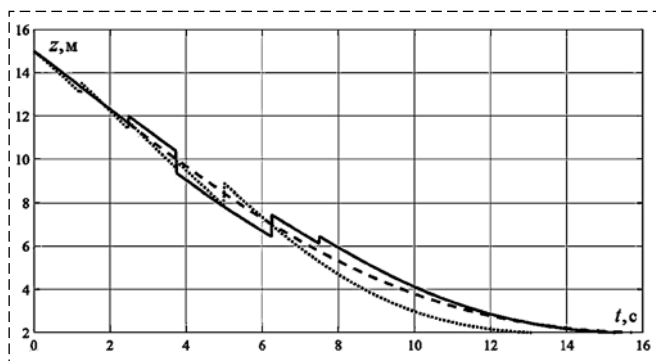


Рис. 7. Графики посадочных траекторий $z(t)$
Fig. 7. Graphs of the landing trajectories $z(t)$

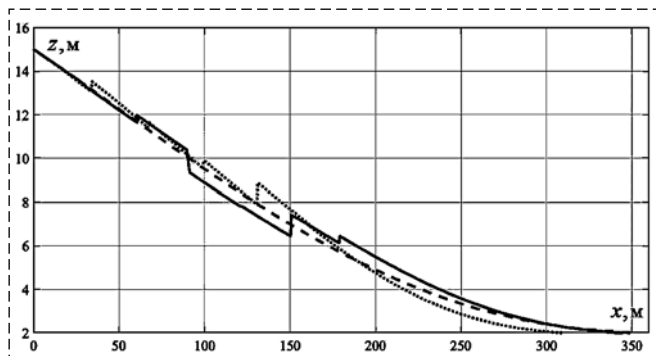


Рис. 8. Графики посадочных траекторий $z(x)$
Fig. 8. Graphs of the landing trajectories $z(x)$

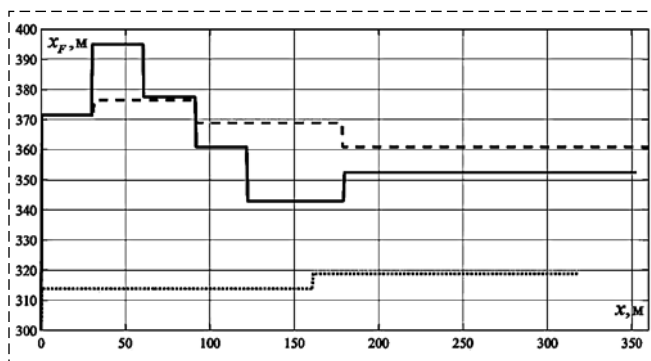


Рис. 9. Графики изменения целевой точки $x_F(x)$
Fig. 9. Graphs of the change and the goal point $x_F(x)$

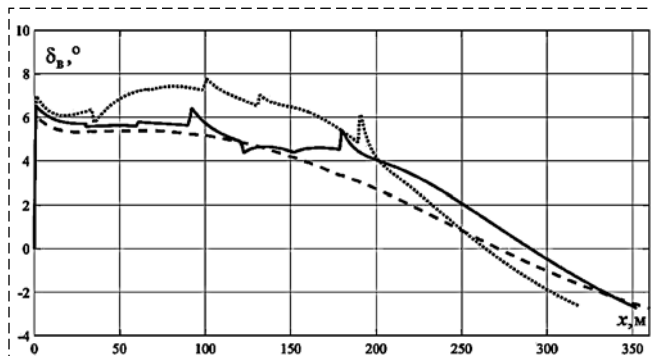


Рис. 10. Графики отклонений угла руля высоты $\delta_v(x)$
Fig. 10. Graphs of the deviations of the elevator $\delta_v(x)$

алгоритмы управления посадкой БПЛА "Аэро-sonde". Полученные результаты компьютерного моделирования показали высокую эффективность синтезированных алгоритмов управления при выполнении всех необходимых требований и ограничений.

Список литературы

1. **Беспилотные** летательные аппараты / Справочное пособие. Воронеж: Изд-во Полиграфический центр "Научная книга", 2015. 616 с.
2. **Биард Р. У., МакЛэйн Т. У.** Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. 312 с.
3. **Gautam A., Sujit P. B., Saripalli S.** A Survey of Autonomous Landing Techniques for UAVs // In Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Orlando, FL, USA. 2014. P. 1210–1218.
4. **Гоммер А. С.** Обзор методов автономной посадки БПЛА // Научное исследование как основа инновационного развития общества: сборник статей Международной научно-практической конференции, в 4 ч. Ч. 2. Уфа: OMEGA SCIENCE, 2019. С. 70–76.
5. **Агеев А. М., Беляев В. В., Бондарев В. Г., Проценко В. В.** Системы автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов: проблемы и пути решения // Военная мысль. 2020. № 4. С. 130–136.
6. **Кравченко П. П., Куликов Л. И., Щербинин В. В.** Применение метода оптимизированных дельта-преобразований в задаче управления посадкой беспилотного летательного аппарата // Известия РАН. Теория и системы управления. 2019. № 5. С. 130–144.
7. **Пенязь И. М.** Инновационные разработки, касающиеся способа безаварийной посадки современных беспилотных летательных аппаратов // Проблемы безопасности полетов. 2029. № 10. С. 34–38.
8. **Burchett B. T.** Feedback Linearization Guidance for Approach and Landing of Reusable Launch Vehicles // in American Control Conference. Proceedings of the 2005. IEEE, 2005. P. 2093–2097.
9. **Nho K., Agarwal R. K.** Automatic Landing System Design Using Fuzzy Logic // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2000. Vol. 23, N. 2. P. 298–304.
10. **Malaek S., Sadati N., Izadi H., Pakmehr M.** Intelligent Autoland Controller Design using Neural Networks and Fuzzy Logic // in Control Conference, 5th Asian. 2004. Vol. 1. IEEE. P. 365–373.
11. **Wang R., Zhou Z., Shen Y.** Flying-wing UAV Landing Control and Simulation based on Mixed h2/h // Mechatronics and Automation, ICMA 2007. International Conference on. IEEE. 2007. P. 1523–1528.
12. **Подоплекин Ю. Ф., Шаров С. Н.** Ключевые вопросы теории и проектирования систем посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда // Информационно-управляющие системы. 2013. № 6. С. 14–24.
13. **Hérissé B., Hamel T., Mahony R., Russotto F.-X.** Landing a VTOL Unmanned Aerial Vehicle on a Moving Platform Using Optical Flow // IEEE Transactions on Robotics. 2012. Vol. 28, N. 1. P. 77–89.
14. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Методы "гибких" траекторий в задачах терминального управления вертикальными маневрами летательных аппаратов / Гл. 2 в монографии "Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники". М.: Машиностроение, 2015. С. 51–110.
15. **Теряев Е. Д., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Петрин К. В.** Концепция "гибких кинематических траекторий" в задачах терминального управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. С. 7–15.
16. **Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В.** Аэродинамика самолета: Динамика продольного и бокового движения. М.: Машиностроение, 1979. 352 с.
17. **Крутько П. Д.** Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение, 2004. 406 с.
18. **Филимонов Н. Б., Сергеев А. А.** Синтез алгоритма управления вертикальным посадочным маневром БПЛА методом гибких кинематических траекторий // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. Iss. 17-2. P. 150–156.
19. **Burston M. T., Sabatini R., Clothier R., Gardi A.** Reverse Engineering of a Fixed Wing Unmanned Aircraft 6-DoF Model for Navigation and Applications // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 629. P. 164–169.
20. **Bateman F., Noura H., Ouladsine M.** Faultdiagnosis and Fault-Tolerant Control Strategy for Theaerosonde UAV // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2011. Vol. 47(3). P. 2119–2137.
21. **Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В.** Динамика самолета. Пространственное движение. М.: Машиностроение, 1983. 320 с.
22. **Паньков С. Я., Забураев Ю. Е., Матвеев А. М.** Теория и методика управления авиацией. В 2 ч. Ч. 1. Ульяновск: УВАУ ГА, 2006. 190 с.
23. **Сергеев А. А., Филимонов Н. Б.** Управление посадочным маневром беспилотного летательного аппарата на подвижную платформу методом "гибких" кинематических траекторий // Известия вузов. Приборостроение. 2020. № 8. С. 689–695.

Control of Autonomous Landing of UAV of Airplane-Type on the Static and Dynamic Sites with Using of "Flexible" Kinematic Trajectories

A. A. Sergeev^{1,2}, alxsrg95@gmail.com, **A. B. Filimonov**^{3,4}, filimon_ab@mail.ru,
N. B. Filimonov^{1,2}, nbfilimonov@mail.ru

¹ Trapeznikov Institute of Control Problems, RAS, Moscow, 117997, Russian Federation,

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation,

³ MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation,

⁴ Moscow Aviation Institute (NRU), Moscow, 125993, Russian Federation

Corresponding author: **Filimonov Nikolay B.**, Professor, Dr. Sci. Tech., Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: nbfilimonov@mail.ru

Accepted on December 02, 2020

Abstract

The final and one of the most important stages of the aircraft-type unmanned aerial vehicles (UAV) flight is landing. In this regard the problem of automating the control by UAV landing in difficult meteorological conditions is becoming increasingly urgent. In some cases for refueling and recharging UAVs it is advisable to use the dynamic mobile landing site (MLS) instead of the traditional stationary landing site (SLS). In the present paper we consider the setting of and solution of the control problem by the terminal landing maneuver of a UAV. It provides its transfer from the current initial state to the target final state along "flexible" kinematic trajectories both on the SLS and on the MLS. To solve the problem of automatic landing of UAV on SLS or MLS the mathematical model of the dynamics of its movement was developed. It's based on the concept of "flexible" kinematic trajectories with spatial synchronization of controlled movements. The control algorithm by the terminal vertical landing maneuver of UAV on SLS by the method of dynamics inverse problem using the principle of "flexible" kinematic trajectories is developed. And also the control algorithm by the terminal landing maneuver of UAV on MLS by the method of dynamics inverse problems using the principles of "flexible" kinematic trajectories and aiming into the target point was also developed. Computer approbation of the synthesized control algorithms for the landing maneuver of UAV "Aerosonde" under conditions of various wind disturbances was carried out using digital modeling in the Matlab environment.

Keywords: landing maneuver of UAV, stationary landing site, mobile landing platform, synthesis of control algorithm, method of dynamics inverse problems, principle of "flexible" kinematic trajectories, principle of the guidance to the target point.

For citation:

Sergeev A. A., Filimonov A. B., Filimonov N. B. Control of Autonomous Landing of UAV of Airplane-Type on the Static and Dynamic Sites with Using of "Flexible" Kinematic Trajectories, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 156—167.

DOI: 10.17587/mau.22.156-167

References

1. Unmanned aerial vehicles: Reference Guide, Voronezh, Poligraficheskij centr "Nauchnaya kniga", 2015, 616 p. (in Russian).
2. Beard R. W., McLain T. W. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice, Princeton University Press, 2012, 320 p.
3. Gautam A., Sujit P. B., Saripalli S. A Survey of Autonomous Landing Techniques for UAVs, *Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Orlando, FL, USA, 2014, pp. 1210—1218.
4. Gommer A. S. Review of Methods of Autonomous Landing of UAVs, *Science-intensive research as the basis of innovative development of society: collection of articles of the International scientific and practical conference*, Ufa, OMEGA SCIENCE, 2019, pp. 70—76 (in Russian).
5. Ageev A. M., Belyaev V. V., Bondarev V. G., Protsenko V. V. The Systems of Automatic Landing for Unmanned Aerial Vehicles, *Problems and Solutions, Military Thought*, 2020, no. 4, pp. 130—136 (in Russian).
6. Kravchenko P. P., Kulikov L. I., Scherbinin V. V. Application of the Method of Optimized Delta-Transformations in the Control Landing Problem for an Unmanned Aerial Vehicle, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, vol. 58, no. 5, pp. 786—800 (in Russian).
7. Penyaz I. M. The Innovative Developments Concerning a Way of Soft Landing of the Modern Unmanned Aerial Vehicles, *Problems of Safety of Flights*, 2019, no. 10, pp. 34—38 (in Russian).
8. Burchett B. T. Feedback Linearization Guidance for Approach and Landing of Reusable Launch Vehicles; in American Control Conference, *Proceedings of the 2005, IEEE*, 2005, pp. 2093—2097.
9. Nho K., Agarwal R. K. Automatic Landing System Design Using Fuzzy Logic; *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2000, vol. 23, no. 2, pp. 298—304, 2000.
10. Malaek S., Sadati N., Izadi H., Pakmehr M. Intelligent Autoland Design using Neural Networks and Fuzzy Logic, in *Control Conference, 5th Asian*, 2004, vol. 1, pp. 365—373.
11. Wang R., Zhou Z., Shen Y. Flying-wing UAV Landing Control and Simulation based on Mixed h2/h, *Mechatronics and Automation, ICMA 2007, International Conference on IEEE*, 2007, pp. 1523—1528.
12. Podoplekin Yu. F., Sharov S. N. Key Aspects of Theory and Design of Landing Systems of UAV on Small Vessels, *Informacionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2013, no. 6, pp. 14—24.
13. Hérisse B., Hamel T., Mahony R., Russotto F.-X. Landing a VTOL Unmanned Aerial Vehicle on a Moving Platform Using Optical Flow, *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 77—89.
14. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Methods of "Flexible" Trajectories in the Tasks of Terminal Control of Aircraft Vertical Maneuvers, *Problems of Control of Complex Dynamic Objects of Aviation and Space Technology*, Ch. 2, Moscow, Machinostroenie, 2015, pp. 51—110 (in Russian).
15. Teryaev E. D., Filimonov A. B., Filimonov N. B., Petrin K. V. The Conception of "Flexible Kinematic Trajectories" in the Problems of Terminal Control by Moving Objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 12, pp. 7—15 (in Russian).
16. Byushgens G. S. Dynamics of the Airplane. Dynamics of Longitudinal and Transverse Motion, Moscow, Machinostroenie, 1979, 352 p. (in Russian).
17. Krutko P. D. Inverse Problems of Dynamics in the Theory of Automatic Control, Moscow, Mashinostroenie, 2004, 406 p. (in Russian).
18. Filimonov N. B., Sergeev A. A. Synthesis of Control Algorithm for the UAV Vertical Landing Maneuver by the Method of Flexible Kinematic Trajectories, *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2019, no. 17—2, pp. 150—156 (in Russian).
19. Burston M. T., Sabatini R., Clothier R., Gardi A. Reverse Engineering of a Fixed Wing Unmanned Aircraft 6-DoF Model for Navigation and Applications, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 629, pp. 164—169.
20. Bateman F., Noura H., Ouladsine M. Faultdiagnosis and Fault-Tolerant Control Strategy for Theaerosonde UAV, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, vol. 47(3), pp. 2119—2137.
21. Byushgens G. S., Studnev R. V. Dynamics of the Airplane. Spatial Motion, Moscow, Machinostroenie, 1983, 320 p. (in Russian).
22. Panjkov S. J., Zaburaev J. E., Matveev A. M. Theory and Methods of Aircraft Control. Ch.1, Ulyanovsk, UVAU GA, 2006, 190 p.
23. Sergeev A. A., Filimonov N. B. Controlling the Maneuver of an Unmanned Aerial Vehicle when Landing on a Mobile Platform Using the Method of "Flexible" Kinematic Trajectories, *Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63, no. 9, pp. 803—812 (in Russian).

31 мая – 4 июня 2021 г., ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Международная научная мультikonференция

**Кибер-физические системы: проектирование и моделирование»
«Cyber-physical systems design and modelling» (CyberPhy-2021)
(Scopus, Springer)**

Секции

1. Cyber-Physical Systems: digital technologies and applications (Кибер-физические системы: цифровые технологии и приложения)
2. Cyber-physical systems: design and application for Industry 4.0 (Кибер-физические системы: проектирование и применение для Индустрии 4.0)
3. Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control (Кибер-физические системы: моделирование и интеллектуальное управление)
4. Society 5.0: Cyberspace for advanced human-centered society (Общество 5.0: киберпространство для развитого общества, ориентированного на человека)

XXXIV Международная научная конференция

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ — ММТТ-34
(РИНЦ, DOI)**

Секции

1. Качественные и численные методы исследования дифференциальных и интегральных уравнений
2. Оптимизация, автоматизация и оптимальное управление технологическими процессами
3. Математическое моделирование технологических и социальных процессов
4. Математическое моделирование и оптимизация в задачах САПР, аддитивных технологий, цифрового производства
5. Математические методы в задачах радиотехники, радиоэлектроники и телекоммуникаций, геоинформатики, авионики и космонавтики
6. Математические методы и интеллектуальные системы в робототехнике и мехатронике
7. Математические методы в медицине, биотехнологии и экологии
8. Математические методы в экономике и гуманитарных науках
9. Информационные и интеллектуальные технологии в технике и образовании
10. Математические и инструментальные методы технологий Индустрии 4.0
11. Обсуждение квалификационных работ

Подача заявок на участие с 15 декабря 2020 г.

**Подробная информация о конференции и условиях участия в ней
размещается на сайте <http://mmtt.sstu.ru/>**

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5510, (499) 269-5397**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 25.12.2020. Подписано в печать 24.02.2021. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН321. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru