

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 24

2023

№ 2

Издается 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.
ЮШЕНКО 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
ШЕРБАТЮК 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
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.
МАГОМЕДОВ М. Х., д.ф.-м.н.
ПУТОВ В. В., д.т.н.
ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.
РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.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

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Шагннев О. Б., Фрадков А. Л. Оценка влияния дискретизации на работу алгоритма скоростного градиента при управлении синхронизацией 59

Тырва В. О., Саушев А. В. Целеуказание совместного управления в системе "человек—машина": моделирование и структуризация 67

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Принцип организации мотивационного поведения и автоматического целеполагания автономных интеллектуальных мобильных систем ... 75

Гайдук А. Р., Лукин Д. С. Синтез нелинейных систем управления автороботами 85

Кабанов С. А., Кабанов Д. С., Митин Ф. В. Оптимизация курсового движения беспилотного автомобиля при наличии препятствий и возмущений 93

Брискин Е. С., Смирная Л. Д., Артемьев К. С. Об управлении тяговыми характеристиками и сопротивлением движению мобильных роботов с шагающими движителями 101

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Neusypin K. A., Proletarsky A. V., Selezneva M. S. Algorithms for Complexing an Inertial Navigation System with Angular Acceleration Sensors 107

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://mech.novtex.ru>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 24

2023

No. 2

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

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.

MAGOMEDOV M. Kh.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEEV 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 prospective 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

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

Shagniev O. B., Fradkov A. L. Influence of Discretization on the Speed Gradient Synchronization Control 59

Tyrva V. O., Saushev A. V. Targeting of Joint Control in the "Man-Machine" System: Modeling and Structuring 67

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

Melekhin V. B., Khachumov M. V. The Principle of Organization of Motivational Behavior and Automatic Goal Setting of Autonomous Intelligent Mobile Systems 75

Gaiduk A. R., Lukin D. S. Design of Nonlinear Control Systems for Autorobots 85

Kabanov S. A., Kabanov D. S., Mitin F. V. Optimization of the Course Movement of an Unmanned Vehicle in the Presence of Obstacles and Disturbances 93

Briskin E. S., Smirnaya L. D., Artemyev K. S. On the Control of Traction Characteristics and Resistance to Movement of Mobile Robots with Walking Propulsion Devices 101

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

Neusypin K. A., Proletarsky A. V., Selezneva M. S. Algorithms for Complexing an Inertial Navigation System with Angular Acceleration Sensors 107

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

О. Б. Шагниева^{1,2}, канд. техн. наук, доц., shagnoleg@yandex.ru,

А. Л. Фрадков^{2,3}, д-р техн. наук, проф., fradkov@mail.ru,

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

² Институт проблем машиноведения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург,

³ Санкт-Петербургский государственный университет

Оценка влияния дискретизации на работу алгоритма скоростного градиента при управлении синхронизацией

Повышение производительности технологических операций является актуальной задачей современной науки. Внедрение современных систем управления промышленным оборудованием сопряжено с цифровизацией и компьютеризацией предприятий. Вибрационная техника является одним из распространенных типов промышленного оборудования, используемого для операций просеивания, дробления, виброперемещения и т. д. Энергетический подход к управлению вибрационными установками позволяет поддерживать постоянный уровень полной энергии колебаний вибрационной установки с грузом, что открывает широкие возможности для интеллектуализации управления оборудованием в условиях неопределенности пространства параметров. Настоящая работа нацелена на исследование влияния цифровизации и дискретизации на работу алгоритма скоростного градиента при управлении кратной синхронизацией роторов вибрационной установки и на оценку критических шагов дискретизации сигналов датчиков. В работе приводятся результаты численного моделирования, основанного на уравнениях динамики системы и приближенных значениях параметров вибрационной установки. Установлено, что рост шага дискретизации приводит к срыву режима кратной синхронизации вплоть до потери устойчивости. Представлены результаты экспериментального исследования на мехатронном вибрационном стенде СВ-2М. Результаты демонстрируют в нормальном режиме работы установление низкочастотных колебаний скоростей вращения роторов и полной энергии системы, частота которых определяется ограничением на значение управляющего сигнала. При увеличении шага дискретизации наблюдается установление движения с остановками, по своему характеру схожее с устойчивыми релаксационными автоколебаниями. Практическая значимость полученных результатов определяется установлением возможных эффектов, возникающих в системе при значительных шагах дискретизации. Дальнейшая разработка адаптивных систем управления может быть нацелена на компенсацию влияния дискретизации на работу скоростного градиента при управлении синхронизацией роторов вибрационной установки.

Ключевые слова: *вибрационная установка, система управления, алгоритм скоростного градиента, цифровизация, дискретное управление*

Введение

Системы управления технологическими процессами в современном мире реализуются на вычислительной технике и, следовательно, являются цифровыми. В условиях цифровой трансформации экономики и промышленности приобретают актуальность исследования влияния дискретизации на работу сложных систем управления в условиях ограничений на мощность вычислительной техники, запаздывания сигналов датчиков и т. д. Настоящая работа посвящена исследованию влияния цифровизации на качество управления синхронизацией роторов вибрационной установки на базе алгоритма скоростного градиента.

Вибрационная техника используется в различных технологических процессах, включающих в себя просеивание сыпучих сред, вибротранс-

портировку и т. д. Стремление к повышению производительности технологических операций определяет необходимость разработки систем управления, обеспечивающих высокое качество синхронизации роторов вибрационной установки в широком диапазоне параметров [1–3].

Основными режимами работы вибрационных установок являются синхронизация и кратная синхронизация скоростей вращения роторов. Режим кратной синхронизации важен с точки зрения обеспечения устойчивых режимов вибротранспортировки за счет создания ненулевого в среднем ускорения платформы с грузом [4, 5]. При этом обеспечение устойчивого режима кратной синхронизации на высоких скоростях вращения является сложной задачей с точки зрения автоматического управления.

Одним из возможных подходов к управлению кратной синхронизацией вибрационной

установки является алгоритм скоростного градиента, основанный на обеспечении требуемого уровня полной энергии колебаний системы [6]. Энергетический подход к управлению синхронизацией вращения роторов вибрационной установки имеет преимущество в сравнении с алгоритмами, основанными на управлении по обратной связи по скоростям вращения роторов. Значительное влияние на динамику системы оказывают перемещения груза, расположенного на платформе. Следовательно, целесообразно использовать комплексный показатель вибрационного состояния системы, которым в алгоритме скоростного градиента служит полная энергия колебаний системы.

В настоящее время активно развиваются методы управления нелинейными системами с учетом дискретности сигналов датчиков и оценки критических значений шага дискретизации [7]. Однако применение этих методов к реальным механическим системам затруднено сложностью процессов и невозможностью приведения математических моделей системы к требуемым формам.

Объектом исследования являются процессы управления синхронизацией скоростей вращения роторов экспериментального мехатронного вибрационного стенда СВ-2М, являющегося прототипом промышленной вибрационной установки. Для управления синхронизацией вращения роторов используется алгоритм скоростного градиента.

В работе представлены результаты моделирования процессов управления синхронизацией вращения роторов вибрационной установки для различных шагов дискретизации. Демонстрировано влияние цифровизации на качество процессов управления вплоть до потери устойчивости системы. Кроме того, представлены результаты аналогичных экспериментальных исследований на вибрационном стенде.

Постановка задачи

Экспериментальный двухроторный вибрационный стенд СВ-2М разработан в Институте проблем машиноведения Российской академии наук для исследовательских и образовательных целей. Механическая часть вибрационного стенда включает в себя пару дебалансных вибровозбудителей, каждый из которых состоит из асинхронного двигателя с частотным преобразователем, вала и ротора с эксцентрично установленным грузом, вращающегося в вертикальной плоскости на корпусе вибрационного

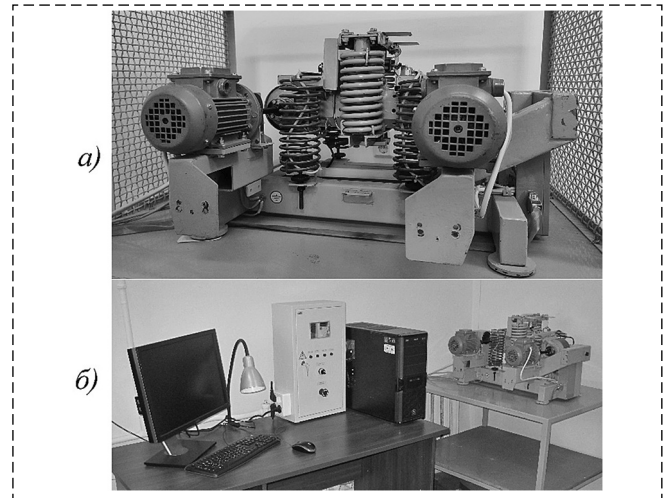


Рис. 1. Вибрационный стенд СВ-2М
Fig. 1. Vibration setup SV-2M

стенда [8]. Вращение неуравновешенных роторов определяет возбуждения колебания платформы, соединенной с опорной рамой четырьмя пружинами. Механическая часть вибрационного стенда представлена на рис. 1, а.

Управление вибрационным стендом в реальном времени осуществляется средствами пакета MATLAB/Simulink с использованием инструмента Real Time. Общий вид экспериментального стенда представлен на рис. 1, б.

Математическая модель вибрационной установки

Расчетная схема механической части вибрационной установки СВ-2М, используемая для разработки математической модели, приведена на рис. 2.

Предполагается, что перемещения вибрационной установки в направлении Z незначительны, т. е. все движения происходят в плоскости

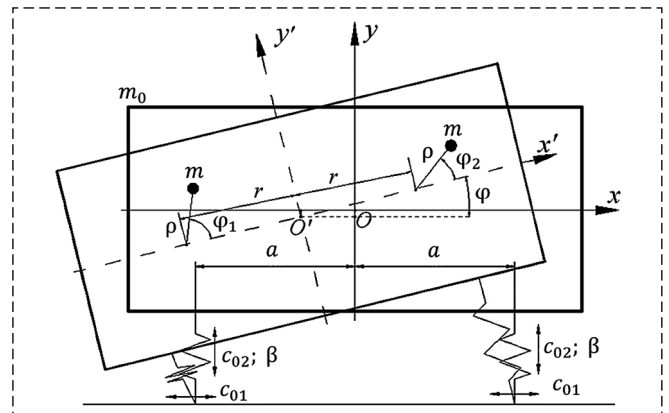


Рис. 2. Расчетная схема вибрационного стенда
Fig. 2. The calculation scheme of vibration setup

ОХУ. Координаты x_c и y_c описывают перемещение платформы в подвижной системе координат $O'X'Y'$. Величина r определяет расстояние от роторов до оси X' . Платформа соединена с опорной рамой пружинами с жесткостью c_{01} и c_{02} в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Координаты точек закрепления пружин равны $\pm a$ в горизонтальном направлении. Угол поворота платформы считается малым. Тогда уравнения, описывающие динамику системы, имеют вид [9]

$$\begin{aligned} m_0 \ddot{x}_c - m\rho \sin \varphi_1 \ddot{\varphi}_1 - m\rho \sin \varphi_2 \ddot{\varphi}_2 - m\rho \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1^2 - \\ - m\rho \cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2^2 + \beta \dot{x}_c + 2c_{01}x_c = 0; \\ m_0 \ddot{y}_c + m\rho \cos \varphi_1 \ddot{\varphi}_1 + m\rho \cos \varphi_2 \ddot{\varphi}_2 - m\rho \sin \varphi_1 \dot{\varphi}_1^2 - \\ - m\rho \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_2^2 + m_0 g + \beta \dot{y}_c + 2c_{02}y_c = 0; \quad (1) \\ J_1 \ddot{\varphi}_1 - m\rho \sin \varphi_1 \ddot{x}_c + m\rho \cos \varphi_1 \ddot{y}_c + \\ + m\rho g \cos \varphi_1 + k_c \dot{\varphi}_1 = M_1; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 - m\rho \sin \varphi_2 \ddot{x}_c + m\rho \cos \varphi_2 \ddot{y}_c + \\ + m\rho g \cos \varphi_2 + k_c \dot{\varphi}_2 = M_2. \end{aligned}$$

В модели динамики системы введены следующие обозначения: φ_i — угол поворота i -го ротора относительно оси мотора; M_i — управляющий момент на i -м моторе; k_c — вязкое трение в моторе; β — коэффициент демпфирования в пружинах; m_0 — масса платформы; ρ — эксцентриситет ротора относительно оси вращения; J_i — момент инерции i -го ротора; m_i — масса дебаланса i -го ротора; g — ускорение свободного падения.

Полная энергия колебаний может быть записана как

$$\begin{aligned} H = 0,5m_0(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + 0,5J_1\dot{\varphi}_1^2 + 0,5J_2\dot{\varphi}_2^2 - \\ - m\rho \sin \varphi_1 \dot{x}_c \dot{\varphi}_1 - m\rho \sin \varphi_2 \dot{x}_c \dot{\varphi}_2 + \\ + m\rho \dot{y}_c (\cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2 + \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1) + m_0 g y_c + \\ + mg\rho (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) + c_{01}x_c^2 + c_{02}y_c^2. \quad (2) \end{aligned}$$

Данное выражение будет использоваться для расчета полной энергии системы как при моделировании, так и при реализации алгоритма скоростного градиента на экспериментальной установке.

Синтез алгоритма управления синхронизацией роторов

Алгоритм скоростного градиента основан на управлении системой по значению ее полной энергии. Общий вид алгоритма скоростного градиента может быть записан как [4]

$$M = -\gamma \nabla_M \dot{Q}(z), \quad (3)$$

где M — вектор управляющих моментов; $\dot{Q}(z)$ — производная по времени целевой функции $Q(z)$; ∇ — символ градиента; z — вектор переменных состояния системы; γ — настроечный параметр алгоритма управления.

Для применения алгоритма скоростного градиента к задачам управления синхронизацией роторов целевая функция должна включать в себя как компоненту, определяющую выход полной энергии системы на заданный уровень, так и компоненту, задающую кратность синхронизации. Такая целевая функция может быть записана как

$$Q(z) = 0,5((1-\alpha)(H-H^d)^2 + \alpha(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)^2), \quad (4)$$

где H^d — задание по значению полной энергии колебаний системы.

Тогда алгоритм управления синхронизацией роторов на базе скоростного градиента примет вид

$$\begin{aligned} M_1 = -\gamma_1 \left((1-\alpha)(H-H^d)\dot{\varphi}_1 + \frac{\alpha}{J_1(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)} \right); \\ M_2 = -\gamma_2 \left((1-\alpha)(H-H^d)\dot{\varphi}_2 \pm \frac{\alpha n}{J_2(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2)} \right). \quad (5) \end{aligned}$$

Здесь n — кратность синхронизации. Настраиваемые параметры алгоритма α , γ_1 , γ_2 подбираются экспериментально. Плюс или минус в слагаемом, определяющем кратность синхронизации, выбирается в зависимости от направления вращения роторов. Данный алгоритм управления использовался при численном моделировании.

Для экспериментальной апробации алгоритма скоростного градиента на мехатронном стенде необходимо привести управляющие моменты к сигналу, поступающему на вход асинхронных двигателей. В работах [4, 10] показано, что в стационарном режиме электромеханическую характеристику асинхронного двигателя можно аппроксимировать линейной комбинацией управления и скорости вращения. Типичные механические характеристики асинхронных двигателей [11] показывают падающую характеристику момента на двигателе при росте скорости вращения ротора. Пусть электромеханические характеристики асинхронных двигателей описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} M_1 = k_1 u_1 - h_1 \dot{\varphi}_1; \\ M_2 = k_2 u_2 - h_2 \dot{\varphi}_2, \quad (6) \end{aligned}$$

где u_1, u_2 — управление на входе двигателей. Предполагается, что точная заводская характеристика асинхронных двигателей неизвестна. Кроме того, с учетом наличия в системе частотного преобразователя, который фактически сам является дополнительной системой управления двигателем, целесообразно считать, что величины k_1, k_2, h_1 и h_2 являются настроечными параметрами регулятора. Учитывая, что в реальной установке на вход двигателя подается управление u , можно с помощью соотношений (5) и (6) получить окончательную форму закона управления:

$$u_1 = \frac{h_1 \dot{\varphi}_1 - \gamma_1((1-\alpha)(H-H^d)\dot{\varphi}_1 + \alpha/J_1(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2))}{k_1},$$

$$u_2 = \frac{h_2 \dot{\varphi}_2 - \gamma_2((1-\alpha)(H-H^d)\dot{\varphi}_2 \pm \alpha n/J_2(\dot{\varphi}_1 \pm n\dot{\varphi}_2))}{k_2}. \quad (7)$$

Таким образом, закон управления на базе алгоритма скоростного градиента включает в себя семь настроечных параметров, подбираемых экспериментально: $\alpha, \gamma_1, \gamma_2, k_1, k_2, h_1$ и h_2 . Для упрощения можно провести алгебраические преобразования, чтобы этих параметров стало меньше, но это приведет к утрате связи настроечных параметров, определяющих электромеханические характеристики двигателей, с их физическим смыслом, что усложнит подбор значений.

Теоретическое обоснование работоспособности синтезированной системы в полном объеме затруднено вследствие нелинейности и многомерности математической модели объекта управления, а также нестандартности цели управления, которая состоит в совпадении или кратности угловых скоростей роторов при достижении заданного уровня полной энергии установки. Известные результаты относятся к исследованию упрощенных моделей, не учитывающих неопределенность параметров, динамику электроприводов и другие факторы [12, 13]. В данной работе делается попытка разработать математический аппарат для анализа влияния дискретизации алгоритма управления.

Дискретизация алгоритма управления энергией

Учет дискретности реализации алгоритма управления будем проводить, ориентируясь на упрощенные версии задачи. Это даст возможность использовать более общие результаты о достижении цели в дискретизованных нелинейных системах.

Математическую модель вибрационного стенда и управления (1), (6) можно представить в обобщенном виде как аффинную по входу модель состояния

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad (8)$$

где $x \in R^n$ — вектор состояния стенда, состоящий из координат, скоростей и т. д.; $f(x), g(x)$ — вектор функций $f(x) \in R^n, g(x) \in R^n$, которые являются гладкими (непрерывно дифференцируемыми). Цель управления (ЦУ) зададим в виде

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(x(t)) \leq \Delta, \quad (9)$$

где $Q(x) = \|h(x)\|^2$ — целевая функция; Δ — предельная погрешность. Функция $h(x) \in R^n$ выбирается исходя из требуемой практической цели. Например, в задаче управления энергией (гамильтонианом) механической системы $H(x)$, где $x = [q, \dot{q}]^T \in R^{2m}, q \in R^m$ — вектор обобщенных координат, $\dot{q} \in R^m$ — вектор обобщенных скоростей, можно взять $h(x) = H(q, \dot{q}) - H^d$, где H^d — заданное значение гамильтониана.

Будем считать, что нам известны верхняя граница начального значения целевой функции Q_0 , т. е. вектор начальных условий x_0 принадлежит множеству $\Omega_0 = \{x : Q(x) \leq Q_0\}$. Предположим также, что функция $h(x)$ — инвариант свободной системы при $x \in \Omega_0$:

$$\dot{h}(x(t)) = \nabla h(x(t))^T f(x(t)) = 0. \quad (10)$$

Для функции энергии соотношение (10), очевидно, выполняется. Непрерывный алгоритм скоростного градиента (3) в этом общем случае будет иметь вид

$$u_c(t) = -\gamma[g(x(t))^T \nabla h(x(t))]h(x(t)), \quad (11)$$

где $\gamma > 0$ — коэффициент усиления.

Рассмотрим дискретизованный (sampled-data) алгоритм (11), имеющий вид

$$u_d = -\gamma[g(x(t_k))^T \nabla h(x(t_k))]h(x(t_k)), \quad (12)$$

при $t_k \leq t < t_{k+1}, t_k = kd, k = 0, 1, 2, \dots$, где $d > 0$ — шаг дискретизации.

Справедливо следующее утверждение.

Теорема 1. Пусть функции $f(x), g(x), h(x), \nabla g(x), \nabla h(x), \nabla^2 h(x)$ ограничены при $x \in \Omega_0$, и существует $\varepsilon_0 > 0$ такая, что $\|g(x)^T \nabla h(x)\| \geq \varepsilon_0$ при $x \in \Omega_0$. Пусть начальные условия такие, что $Q(x_0) \leq Q_1 < Q_0$. Тогда при достаточно малом шаге дискретизации d и некотором C достигнется ЦУ (9) с точностью

$$\Delta = \left(\frac{Cd}{\varepsilon_0} \right)^2. \quad (13)$$

Доказательство теоремы может быть проведено аналогично доказательству теоремы 7.2 в работе [14].

Результаты компьютерного моделирования

Моделирование процессов управления в системе при кратной синхронизации проводилось в программном пакете MATLAB/Simulink.

При моделировании были использованы следующие значения параметров: $m_0 = 9$ кг; $m = 1,5$ кг; $\rho = 0,04$ м; $g = 9,81$ кг·м/с²; $J_1 = J_2 = 0,014$ кг·м²; $J = 0,2$ кг·м²; $k_c = 0,01$ кг·м²/с; $\beta = 5$ кг/с; $r = 0,2$ м; $c_{01} = c_{02} = 5300$ Н/м. Настроенные параметры алгоритма скоростного градиента α , γ_1 , γ_2 для случая кратной синхронизации ($n = 2$) были выбраны следующие: $\alpha = 0,25$; $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,02$. Параметры, определяющие механические характеристики асинхронных двигателей, приняты равными $k_1 = k_2 = 0,00001$; $h_1 = h_2 = 0,01$.

Значение шага дискретизации T варьировалось в диапазоне от 0,001 до 1 с. Учитывая, что на экспериментальном стенде установлено ограничение на управление $u = 30\,000$, при моделировании значения моментов на двигателе были ограничены значением 10 Н·м. Задание по значению полной энергии системы принято $H^d = 60$ Дж. На рис. 3 представлены графики скоростей вращения роторов и полной энергии системы для шага дискретизации 0,01 с.

На рис. 4 представлены графики скоростей вращения роторов и полной энергии системы для шага дискретизации $T = 0,1$ с.

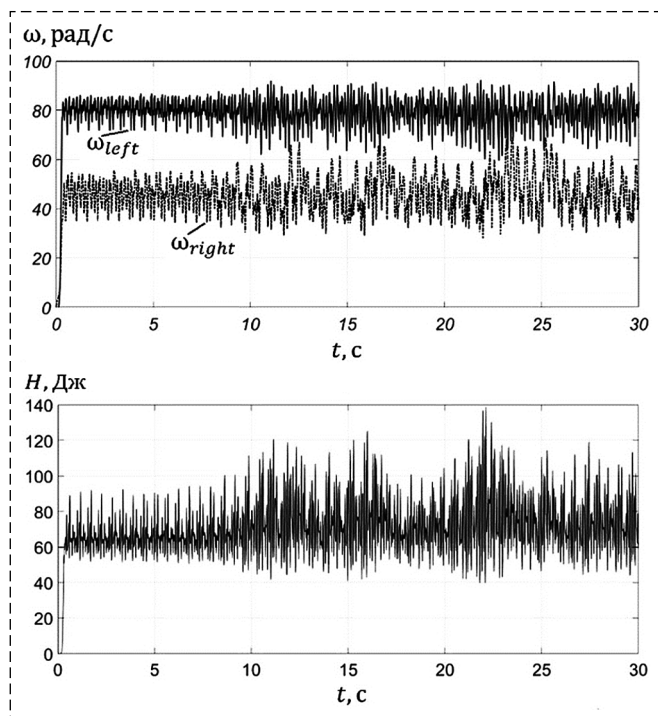


Рис. 3. Скорости вращения роторов и полная энергия колебаний системы при $H^d = 60$ Дж и $T = 0,01$ с

Fig. 3. Rotation speed and total system energy, $H^d = 60$ J and $T = 0,01$ s

Задание по полной энергии колебаний $H^d = 60$ Дж определяет скорости вращения роторов порядка 80 рад/с и 40 рад/с. Таким образом, медленно вращающийся ротор возбуждает колебания платформы вибрационного стенда на частоте, близкой к парциальной частоте

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2c_{02}}{m_0}} \cong 35 \text{ рад/с.}$$

Это приводит к приближению системы к резонансному режиму [6] и, соответственно, к большому размаху колебаний скоростей вращения ротора в сравнении со случаем больших значений задания по полной энергии H^d . Увеличение шага дискретизации до $T = 0,1$ с фактически приводит к срыву режима синхронизации и, в перспективе, к потере устойчивости системы. Характерно, что потеря устойчивости начинается с переходов с режима кратной синхронизации на режим обычной синхронизации. Потеря устойчивости подтверждается возрастающей амплитудой колебаний полной энергии колебаний системы.

Экспериментальные исследования

При проведении экспериментов для учета неизвестных характеристик асинхронных двигателей использовался алгоритм управления (7).

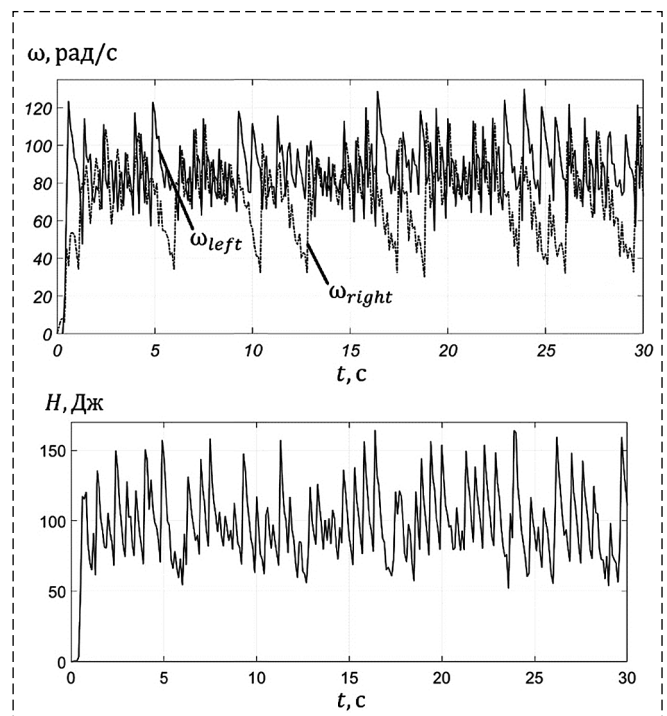


Рис. 4. Скорости вращения роторов и полная энергия колебаний системы, $H^d = 60$ Дж и $T = 0,1$ с

Fig. 4. Rotation speed and total system energy, $H^d = 60$ J and $T = 0,1$ s

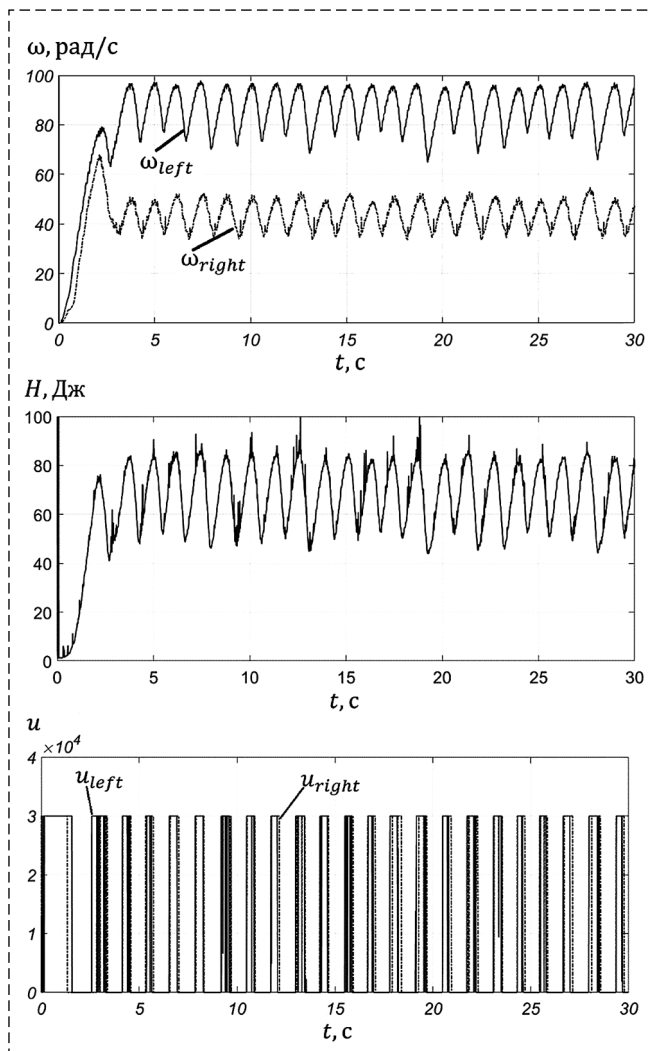


Рис. 5. Скорости вращения роторов, полная энергия колебаний системы и управление на двигателях, $H^d = 60$ Дж и $T = 0,01$ с
 Fig. 5. Rotation speed, total system energy and control signal, $H^d = 60$ J and $T = 0,01$ s

Задание по значению полной энергии системы принято равным $H^d = 60$ Дж. На рис. 5 представлены графики скоростей вращения роторов и полной энергии системы для шага дискретизации $T = 0,01$ с.

На рис. 6 представлены графики скоростей вращения роторов и полной энергии системы для шага дискретизации $0,1$ с.

Результаты экспериментов демонстрируют снижение качества процессов управления синхронизацией роторов и рост амплитуды колебаний значения полной энергии относительно заданного значения. На графиках полной энергии и скоростей вращения роторов наблюдаются низкочастотные осцилляции, частота которых совпадает с частотой достижения управлением предельного значения $u = 30\ 000$. Потери устойчивости вибрационного стенда не происходит, что может объясняться более суще-

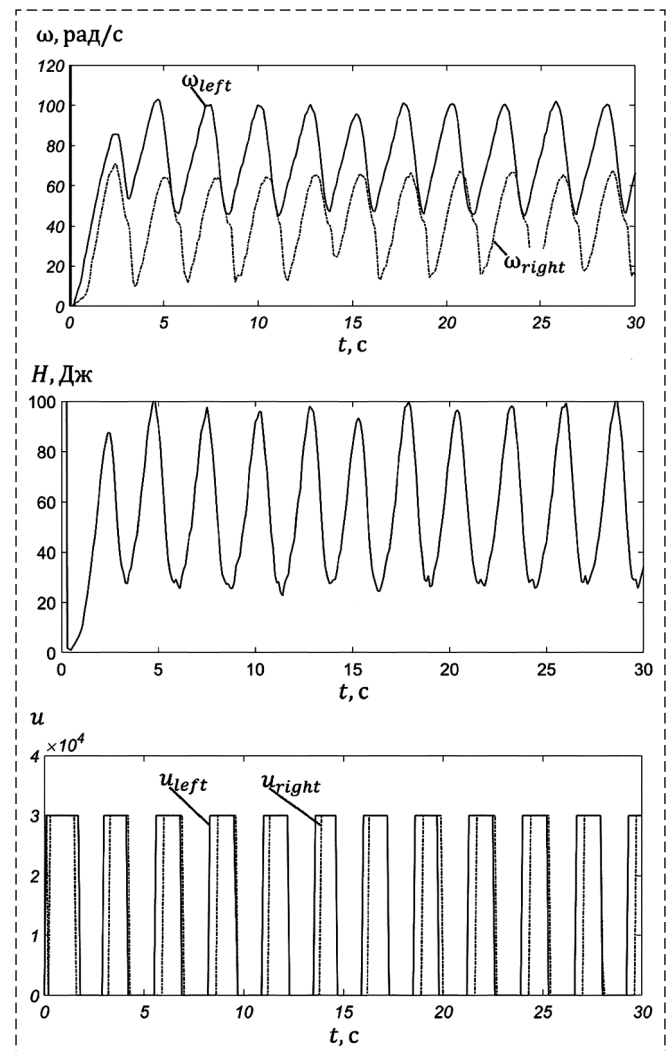


Рис. 6. Скорости вращения роторов, полная энергия колебаний системы и управление на двигателях при $H^d = 60$ Дж и $T = 0,1$ с
 Fig. 6. Rotation speed, total system energy and control signal, $H^d = 60$ J and $T = 0,1$ s

ственной в сравнении с моделью диссипацией энергии, а также жесткими ограничениями на значение управляющего сигнала. При дальнейшем увеличении шага дискретизации T режим кратной синхронизации полностью срывается. Кроме того, в системе наблюдается периодическое падение скоростей вращения роторов и полной энергии системы практически до нуля. На рис. 7 представлены графики скоростей вращения роторов и полной энергии системы для шага дискретизации $0,3$ с.

Заключение

Проведено исследование влияния цифровизации на работу системы управления синхронизацией на базе алгоритма скоростного градиента. Численным моделированием под-

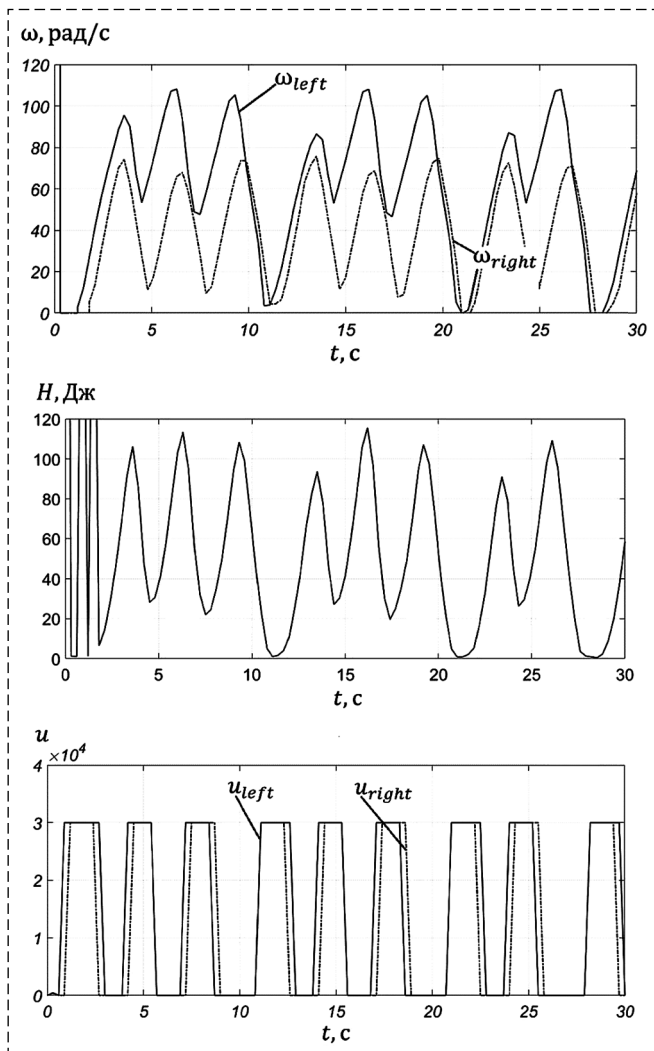


Рис. 7. Скорости вращения роторов, полная энергия колебаний системы и управление на двигателях при $H^d = 60$ Дж и $T = 0,3$ с
 Fig. 7. Rotation speed, total system energy and control signal, $H^d = 60$ J and $T = 0,3$ s

тверждено, что увеличение шага дискретизации может приводить к срыву режима кратной синхронизации на режим обычной синхронизации и к последующей потере устойчивости процесса. В ходе экспериментов подтверждена работоспособность алгоритма скоростного градиента для управления режимом кратной синхронизации. Установлен факт наличия низкочастотных осцилляций на графиках полной энергии системы и скоростей вращения двигателей, обусловленных наличием ограничения на значение управляющего сигнала. Продемонстрировано влияние увеличения шага дискретизации на режим кратной синхронизации. Получен режим срыва кратной синхронизации. Представлены результаты, иллюстрирующие установление режима движения с остановами или релаксационных автоколебаний [15, 16] при достижении критиче-

ских значений шага дискретизации, что может объясняться помимо ограничений на управление падающей электромеханической частотно-моментной характеристикой асинхронных двигателей и внутренним трением в системе.

Список литературы

1. Blekhman I. I., Fradkov A. L., Tomchina O. P., Bogdanov D. E. Self-synchronization and controlled synchronization: general definition and example design // *Mathematics and Computers in Simulation*. 2002. Vol. 58. P. 367–384.
2. Blekhman I. I., Fradkov A. L., Nijmeijer H., Pogromsky A. Yu. On self-synchronization and controlled synchronization // *Systems and Control Letters*. 1997. Vol. 31. P. 299–305.
3. Andrievsky B. R., Fradkov A. L., Tomchina O. P., Boikov V. I. Angular velocity and phase shift control of mechatronic vibrational setup // *IFACPapersOnLine*. 2019. Vol. 52, Iss. 15. P. 436–441.
4. Blekhman I. I. *Vibrational Mechanics*. World Scientific, Singapore, 2000. 536 p.
5. Gorlatov D. V., Tomchin D. A., Tomchina O. P. Controlled Passage through Resonance for Two-Rotor Vibration Unit: Influence of Drive Dynamics // *IFACPapersOnLine*. 2015. Vol. 48, Iss. 11. P. 313–318.
6. Andrievsky B. R., Fradkov A. L. Speed Gradient Method and Its Applications // *Automation and Remote Control*. 2021. Vol. 82, Iss. 9. P. 1463–1518.
7. Fridman E. Brief paper: A refined input delay approach to sampled-data control // *Automatica*. 2010. Vol. 46, Iss. 2. P. 421–427.
8. Андриевский Б. Р., Блехман И. И., Блехман Л. И., Бойков В. И., Васильков В. Б., Фрадков А. Л. Учебно-исследовательский мехатронный комплекс для исследования вибрационных устройств и процессов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2016. № 4. С. 90–97.
9. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Andrievsky B. R., Boikov V. I. Control of phase shift in two-rotor vibration units // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2021. Vol. 29, Iss. 3. P. 1316–1323.
10. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособ. для вузов / М.: Энергия, 1979. 616 с.
11. Архипцев Ю. Ф., Котеленец Н. Ф. Асинхронные электродвигатели. М.: Энергоатомиздат, 1986. 104 с.
12. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Tomchin D. A. Controlled passage through resonance in mechanical systems // *Journal of Sound and Vibration*. 2011. Vol. 330, Iss. 6. P. 1065–1073.
13. Фрадков А. Л., Томчина О. П., Галицкая В. А., Горлатов Д. В. Интегро-дифференцирующие алгоритмы скоростного градиента в задачах кратной синхронизации вибрационных установок // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. Т. 83, № 1. С. 30–37.
14. Амелина Н. О., Ананьевский М. С., Андриевский Б. Р., Граничин О. Н., Джунусов И. А., Матвеев А. С., Проскурников А. В., Пчелкина И. В., Селиванов А. А., Фрадков А. Л., Фридман Э. М., Фуртат И. Б. Проблемы сетевого управления / Под редакцией д.т.н., проф. А. Л. Фрадкова. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. 392 с.
15. Байдина Т. А., Бурдаков С. Ф., Шагниев О. Б. Управление импульсным сглаживанием фрикционных автоколебаний при контактном взаимодействии робота с обрабатываемой поверхностью // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2018. Т. 11, № 4. С. 119–129.
16. Шагниев О. Б., Шаньшин И. К., Бурдаков С. Ф. Управление регенеративными автоколебаниями в процессе фрезерования // *Мехатроника. Автоматизация. Управление*. 2019. Т. 20, № 5. С. 291–298.

Influence of Discretization on the Speed Gradient Synchronization Control

O. B. Shagniev^{1,2}, shagnoleg@yandex.ru, A. L. Fradkov^{2,3}, fradkov@mail.ru,

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russian Federation,

² Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation,

³ Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Corresponding author: **Shagniev Oleg B.**, Ph.D., Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: *shagnoleg@yandex.ru*

Accepted on November 09, 2022

Abstract

Increasing the productivity of technological operations is a current task of modern science. The introduction of modern industrial equipment control systems is associated with the digitalization and computerization of enterprises. Vibration technology is one of the common types of industrial equipment used for screening, crushing, vibratory movement, etc. The energy approach for the vibration setups control makes it possible to keep a constant level of total energy of vibration setup oscillations, which makes it possible to develop intelligent control system under conditions of uncertainty in the parameter space. This paper is devoted to the study of the influence of digitalization and discretization on the speed gradient algorithm operation for the multiple synchronization control of vibration setup rotors and evaluation of the critical sensor signals sampling steps. The paper presents the results of numerical simulation based on the system dynamics equations and approximate values of vibration setup parameters. The simulation results present that an increase of the discretization sampling step leads to a disruption of the multiple synchronization mode up to the stability loss. The results of an experimental study on a mechatronic vibration setup SV-2M demonstrate in normal operation mode the low-frequency oscillations of the rotors speeds and the total system energy, which frequency is determined by the control signal limit. When the discretization step increase, the motion with stops is observed, which has a similar nature with the stable relaxation self-oscillations. The practical relevance of the obtained results is a detection of possible effects that occur in the system with significant discretization steps. Further development of adaptive control systems can be aimed to compensating of the discretization effect on the operation of the speed gradient control of the vibration setup rotors synchronization.

Keywords: vibration setup, control system, speed-gradient algorithm, digitalization, discrete control

For citation:

Shagniev O. B., Fradkov A. L. Influence of Discretization on the Speed Gradient Synchronization Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 59–66.

DOI: 10.17587/mau.24.59-66

References

1. Blekhan I. I., Fradkov A. L., Tomchina O. P., Bogdanov D. E. Self-synchronization and controlled synchronization: general definition and example design, *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, vol. 58, pp. 367–384.
2. Blekhan I. I., Fradkov A. L., Nijmeijer H., Pogromsky A. Yu. On self-synchronization and controlled synchronization, *Systems and Control Letters*, 1997, vol. 31, pp.299–305.
3. Andrievsky B. R., Fradkov A. L., Tomchina O. P., Boikov V. I. Angular velocity and phase shift control of mechatronic vibrational setup, *IFAC PapersOnLine*, 2019, vol. 52, iss.15, pp. 436–441.
4. Blekhan I. I. *Vibrational Mechanics*, Singapore, World Scientific, 2000. 536 p.
5. Gorlatov D. V., Tomchin D. A., Tomchina O. P. Controlled Passage through Resonance for Two-Rotor Vibration Unit: Influence of Drive Dynamics, *IFAC PapersOnLine*, 2015, vol. 48, iss. 11, pp. 313–318.
6. Andrievsky B. R., Fradkov A. L. Speed Gradient Method and Its Applications, *Automation and Remote Control*, 2021, vol. 82, iss. 9, pp. 1463–1518.
7. Fridman E. Brief paper: A refined input delay approach to sampled-data control, *Automatica*, 2010, vol. 46, iss. 2, pp. 421–427.
8. Andrievsky B. R., Blekhan I. I., Blekhan L. I., Boikov V. I., Vasilkov V. B., Fradkov A. L. Educational and research mechatronic setup for the study of vibration devices and processes, *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2016, iss. 4, pp. 90–97 (in Russian).
9. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Andrievsky B. R., Boikov V. I. Control of phase shift in two-rotor vibration units, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, vol. 29, iss. 3, pp. 1316–1323.
10. Chilikin M. G., Klyuchev V. I., Sandler A. S. *Theory of automated electric drive: Textbook for universities*, Moscow, Energiya, 1979, 616 p. (in Russian).
11. Arkhipov Yu. F., Kotelenets N. F. *Asinkhronnyye elektrodvigateli. 2-e izd., pererab. i dop.* [Asynchronous electric motors, Moscow, Energoatomizdat, 1986, 104 p. (in Russian).
12. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Tomchin D. A. Controlled passage through resonance in mechanical systems, *Journal of Sound and Vibration*, 2011, vol. 330, iss. 6, pp.1065–1073.
13. Fradkov A. L., Tomchina O. P., Galitskaya V. A., Gorlatov D. V. Integro-Differentiating Algorithms of Speed Gradient in Problems of Multiple Synchronization of Vibration Setups, *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 2013, vol. 83, iss. 1, pp. 30–37 (in Russian).
14. Amelina N. O., Ananievskiy M. S., Andrievsky B. R., Granichin O. N., Dzhunusov I. A., Matveev A., Proskurnikov A. V., Pchelkina I. V., Selivanov A. A., Fradkov A. L., Fridman E. M., Furtat I. B. *Problems of network control*, Edited by Doctor of Technical Sciences, prof. A. L. Fradkov, Moscow, Izhevsk, Institut komputernykh issledovaniy, 2015, 392 p. (in Russian).
15. Baidina T. A., Burdakov S. F., Shagniev O. B. Control of impulse smoothing of frictional self-oscillations during contact interaction of the robot with the surface to be treated, *Nauchno-tehnicheskiiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*, 2018, vol. 11, iss 4, pp. 119–129 (in Russian).
16. Shagniev O. B., Shanshin I. K., Burdakov S. F. Control of regenerative self-excited vibrations in the milling process, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2019, iss. 5, pp. 291–298 (in Russian).

В. О. Тырва, канд. техн. наук, проф., v.tyrva@mail.ru,
 А. В. Саушев, д-р техн. наук, зав. каф., saushev@bk.ru,
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», г. Санкт-Петербург

Целеуказание совместного управления в системе "человек—машина": моделирование и структуризация

Рассматривается категория "целеуказание" как верхний уровень совместного управления объектом в эргатической системе "человек—машина". Под целеуказанием понимается исходная потребность, которая предшествует планированию и исполнению управляемого движения некоторого объекта эргатической системы. Такое управление представляется как вариант ситуационного управления, определенного Д. С. Поспеловым на основе модели действий и ответных реакций человека-оператора и машины, принятой в инженерной психологии. Управляющему автомату системы придают свойства, присущие человеку-оператору. Антропоморфизм управляющих действий используется в конструировании целеуказания управляющему автомату на множестве неполных представлений элементарных движений изображающей точки по траектории в пространстве состояний системы "человек—машина". Показано, что угловые точки траектории отмечают в пространстве состояний полные ситуации, смена которых вызывается сигналами дискретного антропоморфного управления. Смене ситуаций и элементарным движениям поставлены в соответствие элементарные цели и промежуточные цели в структурированной иерархии упорядоченной во времени полной системы целей целеуказания. Получены количественные оценки полной системы целей. Показана принципиальная возможность структурирования целеуказания на всем этапе эксплуатации жизненного цикла системы "человек—машина".

Описание принятого подхода к конструированию целеуказания сопровождается примером применения методов теории оптимального управления и экспертных мнений и оценок судоводителей для организации антропоморфного управления движением судна в условиях повышенной опасности. Приведены результаты анализа экспериментальных данных, по которым даны количественные оценки полных систем целей, реализованных в исполненных движениях судов при достижении главной цели — ввода судна в камеру шлюза. Аналогичные оценки для сравнения выполнены по шаблонам антропоморфного управления, разработанным для той же главной цели. Приведены итоги обсуждения полученных результатов исследования. Показаны возможности учета параметрических, сигнальных и координатных неопределенностей математических моделей для согласования целеуказания с планированием антропоморфного управления движением судна.

Ключевые слова: эргатическая система, цель, управление, ситуация, пространство состояний, модель, неопределенность, судно

Введение

Под целеуказанием (ЦУ) будем понимать исходную потребность, которая предшествует планированию и исполнению управляемого движения некоторого объекта эргатической системы [1], например объекта водного транспорта — судна, движущегося по морю, по реке или по другим водным путям. Во взаимодействии судоводителя (человека-оператора, ЧО) и технической части эргатической системы "судоводитель—судно" (системы "человек—машина", СЧМ) совмещаются функции управления движением судна (состоянием СЧМ) на уровнях целеуказания, планирования и исполнения [2]. Наделение технической части СЧМ — управляющего автомата (УА) — искусственным интеллектом открывает возможности компенсации и, в конечном счете, устранения таких недостатков, присущих человеку, как:

— субъективность принимаемых решений, особенно в условиях острого дефицита времени и отсутствия достаточно полной информации [3];

— возможность появления случайных и непреднамеренных ошибок при обработке информации или формировании информационных сообщений;

— низкая вычислительная мощность, неспособность воспринимать большое число вариантов исходов и быстро прогнозировать результаты принятых решений.

Повышению качества управления объектом СЧМ способствует дополнение управляющих воздействий на объект использованием специальных предназначенных для этого аппаратов человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) — аппаратов совместного управления, которые посредством перемещения их органа управления позволяют реализовать антропоморфное управление объектом со стороны самого УА [4—8]. Намерения УА реализуются как антропоморфное управление в том случае, если с ними совпадают намерения ЧО, который, "соглашаясь" с УА, не корректирует действия УА. При совместном управлении ЧО имеет приоритет в управлении объектом СЧМ

и возможность его использования для корректировки намерений УА путем дополнительного перемещения органа управления аппарата совместного управления.

Например, для СЧМ "судоводитель—судно" независимо от того, реализуется ли совместное управление движением судна или судно на некоторых интервалах времени используется как беспилотный объект, антропоморфное управление, вырабатываемое УА, является вариантом ситуационного управления [9—12]. Это управление целесообразно рассматривать на уровне исполнения для всего этапа эксплуатации жизненного цикла СЧМ. Представляя эргатическую систему "судоводитель—судно" как эргамат [13, 14], будем исходить из того, что на уровне ЦУ конечную (стратегическую) цель задает ЧО. Частные (тактические) цели, необходимые для достижения конечной цели, определяются УА самостоятельно или с участием ЧО. В связи с этим ЦУ как верхний уровень управления представляется результатом моделирования перехода из начального состояния СЧМ в новое состояние для достижения конечной цели в расчете на реализацию антропоморфного управления на уровне исполнения. При этом актуальной является задача представления целей управления в математической форме. Это требуется для того, чтобы УА выполнял необходимые расчеты при планировании и исполнении управляющих воздействий в СЧМ для достижения конечной цели. Однако такую цель для ситуационного управления на ограниченном отрезке времени жизненного цикла СЧМ при условии, что эксплуатация СЧМ на этом не завершается, только условно можно считать "конечной". Последующую условно конечную цель при эксплуатации СЧМ на жизненном цикле необходимо определить, по крайней мере, до перехода СЧМ в "конечное" состояние, соответствующее уже определенной цели. Поэтому ЦУ и планирование управления, имея ввиду ситуационное, а в рассматриваемой задаче — антропоморфное, управление, необходимо осуществлять в условиях, когда требуется определять начальное и конечное состояния СЧМ для интервала планирования путем экстраполяции траектории в пространстве состояний из какой-либо предшествующей ситуации. Целью работы является решение задачи "экстраполяции ЦУ" на примере эргатической системы "судоводитель—судно".

Моделирование целеуказания совместного управления объектом системы "человек—машина"

В работах [1, 4] на примере эргатической системы "судоводитель—судно" достаточно подробно описана процедура формализации вербальной модели действий и ответных реакций ЧО и машины с привлечением метода пространства состояний. В общем случае процедура формализации приводит к построению множества неполных представлений элементарных движений

$$\mathbf{Z} = \{\dot{X} = F^r(X), r = 1, 2, \dots, R\}, \quad (1)$$

где $F^r(X)$ — вектор-функция от вектора X , представляемого матрицей-столбцом фазовых координат x_1, x_2, \dots, x_N в $(1 + N)$ -мерном пространстве состояний $\{t \times x_1 \times x_2 \times \dots \times x_N\}$; r — порядковый номер вектор-функции $F^r(X)$ в множестве \mathbf{Z} . Точка над буквой X обозначает применение операции дифференцирования фазовых координат по времени t . Там, где это необходимо, зависимость координаты x_i ($i \in \overline{1, \dots, N}$) от времени t представляется в виде $x_i(t)$.

Каждый элемент множества (1) в развернутом виде представляет нормальную систему обыкновенных дифференциальных уравнений, в которой в математической форме выражены действия ЧО и реакция объекта СЧМ. Термин "неполное представление движения" заимствован из работы [15], в которой Г. В. Корнев показал конструктивность неполных представлений движения. В рассматриваемом случае это важно в том отношении, что каждому неполному представлению $\dot{X} = F^r(X)$ элементарного движения СЧМ из множества (1) может быть поставлено в соответствие в общем случае несколько возможно нечетких формулировок цели элементарного движения, вызванного определенным управляющим действием. Например, для системы "судоводитель—судно" перемещению органа управления главным двигателем в определенном направлении могут соответствовать формулировки намерения: увеличить скорость, двигаться быстрее, прибавить ход, увеличить "обороты" и т. п. Все формулировки относятся к определенному элементу из множества (1) при некотором значении r .

Отметим возможную неоднозначность требования к управляющему действию. Например, достижению цели (условно конечной), форму-

лируемой как "малый ход", может соответствовать намерение переместить орган управления в направлении "увеличить", если судно только начинает движение из состояния неподвижности, или переместить орган управления в направлении "уменьшить", если судно движется с большой скоростью при соответствующем положении органа управления главным двигателем. Двум разным исходным ситуациям соответствуют разные управляющие действия и соответствующие элементарные движения системы "судоводитель—судно". Это необходимо учитывать при экстраполяции ЦУ.

Исходной задачей для ЦУ является задание представления элементарного движения, непосредственно предшествующего началу антропоморфного управления целедостижением, и значений фазовых координат на момент начала управления для левого конца траектории в пространстве состояний. Совокупность этих требований отражает полную ситуацию по Д. А. Поспелову [9], которую можно соотнести с полной ситуацией, соответствующей конечной цели предыдущего этапа целедостижения. Вторая задача предусматривает задание значений фазовых координат на правом конце траектории при достижении актуальной цели и конкретизацию представления элементарного движения, к которому переходит СЧМ непосредственно после окончания антропоморфного управления на времени планирования. Таким образом, закладывается основа для последующего целеуказания — как бы для последующего "движения" по этапу эксплуатации СЧМ на жизненном цикле. Наглядная иллюстрация обеих задач на примере трехмерного пространства состояний показана на рис. 1.

Полная ситуация A на момент t_s начала антропоморфного управления на интервале $[t_s, t_f]$ его планирования определяется значениями t_s , $x_1(t_s)$, $x_2(t_s)$ и представлением (сплошная линия на рис. 1) элементарного движения $\dot{X} = F^r(X)$, включая точку $(t_s, x_1(t_s), x_2(t_s))$ в пространстве состояний $\{t \times x_1 \times x_2\}$. Аналогично системой данных $\{t_f, x_1(t_f), x_2(t_f), \dot{X} = F^k(X)\}$ определяется полная ситуация B на момент t_f окончания антропоморфного управления на интервале $[t_s, t_f]$. Представление элементарного движения с номером r непосредственно предшествует интервалу планирования $[t_s, t_f]$, а представление элементарного движения с номером k следует непосредственно за интервалом планирования. Эти представления достаточно определить на

малых интервалах времени $(t_s - \Delta t, t_s + \Delta t)$ и $(t_f - \Delta t, t_f + \Delta t)$ при $\Delta t > 0$.

Цель антропоморфного управления, т. е. указание перехода от начальной ситуации к конечной ситуации в рассмотренном выше смысле, иллюстрируется на рис. 1 с помощью штриховой линии со стрелкой. Как следует из вышесказанного, принцип формализации цели с помощью полных ситуаций относится в равной степени как к конечным (стратегическим) целям, так и к частным (тактическим) целям, рассмотренным в работе [13].

Обобщая содержание рис. 1, представим формально цель $C_{s \rightarrow f}$ антропоморфного управления в следующем виде:

$$C_{s \rightarrow f} =: \{[t_s, X(t_s), \dot{X}(t) = F^r(X(t))] \rightarrow [t_f, X(t_f), \dot{X}(t) = F^k(X(t))]\} \quad (2)$$

Эта цель характеризуется следующими свойствами:

- 1) $t_f \geq t_s$;
- 2) если $t_f = t_s$, то имеет место элементарная цель C_s , для которой в формуле (2) $k \neq r$, т. е. $F^k(X(t)) \neq F^r(X(t))$ (в множестве (1) нет попарно одинаковых элементов); причиной смены элементарного движения с представлением $\dot{X} = F^r(X)$ на элементарное движение с представлением $\dot{X} = F^k(X)$ является сигнал дискретного управления (СДУ)

$$U_r^k(t_s) = \{t_s, F^r(X(t_s)), F^k(X(t_s))\}, \quad (3)$$

исходящий от ЧО или УА [16, 17];

- 3) если $t_f > t_s$, то для конечной (стратегической) цели $C_{s \rightarrow f}$ в промежутке между ситуациями A и B формула (2) может содержать произвольное конечное множество полных ситуаций, элементарных целей и соответствующих СДУ вида (3).

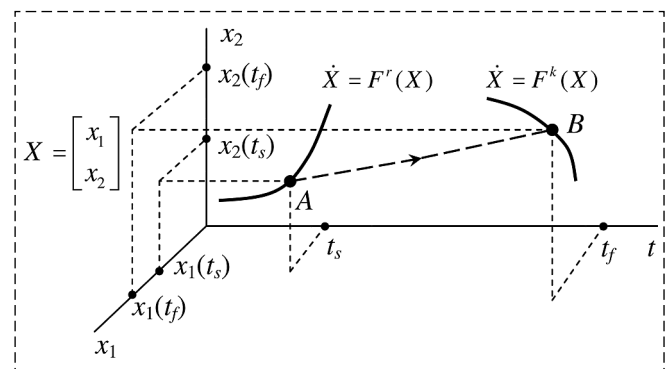


Рис. 1. Иллюстрация граничных ситуаций A, B целеуказания
Fig. 1. Illustration of boundary situations A, B of target designation

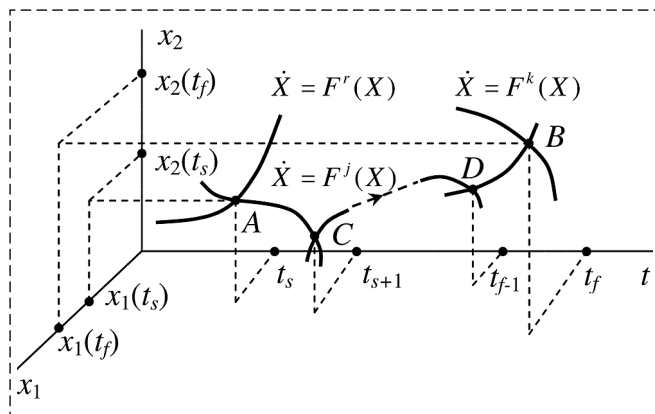


Рис. 2. Иллюстрация ситуаций *A, C, D, B* целеуказания
 Fig. 2. Illustration of target designation situations *A, C, D, B*

Рис. 2 конкретизирует рис. 1 и иллюстрирует последний (третий) вариант представления ситуаций и целей антропоморфного управления.

Парные ситуации *A, C* и *D, B* "разделяются" некоторыми элементарными движениями $\dot{X} = F^j(X)$ из множества (1). Этим ситуациям соответствуют элементарные цели $C_s, C_{s+1}, \dots, C_{f-1}, C_f$.

Конечная цель $C_{s \rightarrow f}$, частные цели $C_{s \rightarrow s+1}$ и $C_{f-1 \rightarrow f}$, определяющие переходы от ситуации *A* к ситуации *C* и от ситуации *D* к ситуации *B*, а также элементарные цели $C_s, C_{s+1}, \dots, C_{f-1}, C_f$ являются элементами ЦУ антропоморфного управления. В полном объеме ЦУ антропоморфного управления определяется целями различных уровней, образующих полную систему целей ЦУ [18].

Представим полную систему целей ЦУ на примере рис. 3 в виде иерархической системы со слабыми связями, взяв за основу рис. 2 и положив $s = 1, f = 5$.

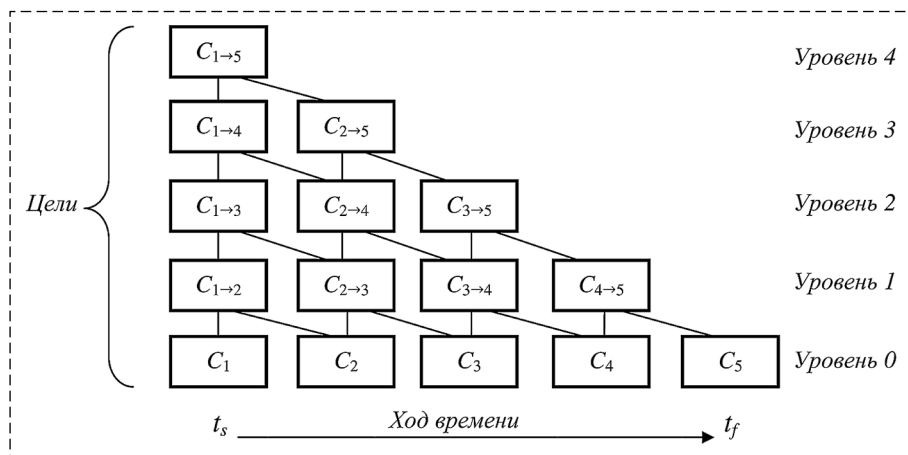


Рис. 3. Пример иерархической структуры полной системы целей антропоморфного управления системы человек-машина

Fig. 3. An example of the hierarchical structure of the complete system of goals of anthropomorphic management of the man-machine system

Уровень цели в ЦУ антропоморфного управления определяется в соответствии с представлением (2) как разность $f - s$. Число уровней Q равно $f - s + 1$. Нижнему уровню присваивается номер 0. В общем случае, если ЦУ рассматривается на $Q = f - s + 1$ уровнях целей, то полное (максимальное) число целей в ЦУ равно

$$P(Q) = \frac{Q(Q+1)}{2}. \quad (4)$$

Таким образом, ЦУ как составляющая антропоморфного управления СЧМ определяется до начала исполнения управления объектом СЧМ на некотором отрезке времени $[t_s, t_f]$ этапа эксплуатации в полном объеме упорядоченной во времени иерархической системой целей со слабыми связями. На каждом уровне целей ЦУ вербальным представлениям целей соответствуют их математические модели в пространстве состояний, что дает возможность при планировании антропоморфного управления ставить и решать задачи расчета СДУ численными методами.

Обсуждение

Последовательность ситуаций, иллюстрируемая рис. 2, и соответствующая ей полная система целей, представленная на рис. 3, рассматриваются как фрагмент ЦУ на этапе жизненного цикла СЧМ. Практическим примером подобного фрагмента может служить ЦУ антропоморфного управления упомянутым выше вводом судна в камеру шлюза (рис. 4).

По результатам осциллографирования управляющих действий судоводителей более чем

на 20 судах в натурных экспериментах было установлено, что судоводители при ручном управлении судном вырабатывают от 17 до 35 сигналов дискретного управления в форме (3) на интервале времени движения судна из неподвижного состояния у причальной стенки вне шлюза в неподвижное состояние в камере шлюза [19]. Этим экспериментальным данным соответствует согласно (4) полное число целей ЦУ $P(17) = 153$ и $P(35) = 630$. Такое число целей ЦУ судоводитель не способен сформировать

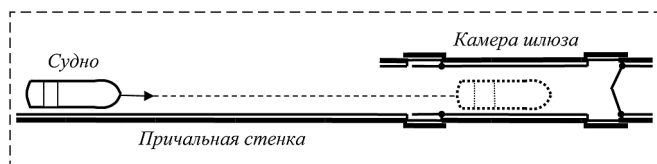


Рис. 4. Иллюстрация процесса ввода судна в камеру шлюза
Fig. 4. Illustration of the process of entering the vessel into the lock chamber

для УА непосредственно перед реализацией антропоморфного управления из-за их больших значений. Судоводитель оперирует относительно небольшим числом целей разного уровня, как правило, априори, не конкретизируя цели нулевого уровня — элементарные цели.

По результатам проведенных исследований построен шаблон оптимального по быстродействию антропоморфного управления для одновинтовых судов, предусматривающий реализацию 10 СДУ [1]. Для построения шаблона использовались методы теории оптимального управления, мнения и экспертные оценки судоводителей. С каждым СДУ соотнесена цель нулевого уровня. Такому числу элементарных целей соответствует полная система из $P(10) = 55$ целей на 10 уровнях иерархии. Анализ целей на разных уровнях иерархии при движении от цели верхнего уровня к элементарным целям нулевого уровня позволил выявить особенности конструирования ЦУ.

Показана возможность применения решения задачи оптимального управления по методу принципа максимума Л. С. Понтрягина в качестве первого шага для определения ЦУ для управления одновинтовым судном. В местах разрыва функции управления переход к антропоморфному управлению осуществлен с привлечением экспертных оценок судоводителей. В результате определены цели нулевого уровня и соответствующие СДУ пропульсивным комплексом судна. Построен шаблон оптимального по быстродействию антропоморфного управления. Благодаря свойству инвариантности шаблона управления к расстоянию, на которое перемещается судно, ЦУ оказывается универсальным в том отношении, что применимо к различным проектам одновинтовых судов и расстояниям перемещения к шлюзу или в аналогичных условиях из состояния неподвижности также в неподвижное состояние в другом месте [1].

Выявлена возможность построения ЦУ, специфичная в том отношении, что уровень планирования антропоморфного управления

при этом может не затрагиваться. Для постановки и решения задачи оптимального управления может использоваться упрощенная модель динамики одновинтового судна, вплоть до такой, которая позволяет получить аналитическое решение в общем виде. Это связано с тем, что при конструировании ЦУ, "спускаясь" на нулевой уровень, не нужно рассчитывать моменты действия СДУ в формуле (3). Поэтому для решения задачи на основе теоремы А. А. Фельдбаума об n интервалах определяется число интервалов управлений, оптимальных по быстродействию [20, 21], и этим интервалам ставятся в соответствие элементарные цели ЦУ.

Для двухвинтового судна задача оптимального управления в классическом варианте метода принципа максимума не является корректной в том смысле, что получаемое решение не является единственным [17]. Поэтому за основу взято решение по одновинтовому судну. Далее при переходе к антропоморфному управлению на бесконечном множестве решений с помощью экспертов без нарушения оптимальности по быстродействию построен шаблон антропоморфного управления, которое, по мнению экспертов, имеет максимальную надежность в том смысле, что минимизирует вероятность навала судна на ворота шлюза при вводе в камеру и возникновения тем самым аварийной ситуации [17]. Шаблон антропоморфного управления и соответствующее ЦУ для двухвинтового судна универсальны в рассмотренном выше смысле. Полная система целей ЦУ антропоморфного управления двухвинтовым судном составляет $P(12) = 78$, образуя 12 уровней иерархии.

Ограничением интервала времени $[t_s, t_f]$, для которого конкретизируется ЦУ, помимо большого объема целей в ЦУ является существование неопределенности моделей СЧМ и внешней среды. Неопределенность необходимо учитывать при планировании антропоморфного управления. Она проявляется в возникновении ситуаций, содержание которых априори не может быть спрогнозировано. Это обстоятельство рассмотрено в работе [1] на примере учета априорных параметрических, сигнальных и координатных неопределенностей, приводящих к образованию областей координатной неопределенности в пространстве состояний, через которые проходит расчетная траектория программного движения СЧМ в соответствии с ЦУ. Поэтому в качестве ограничения времени (t_f), на которое конкретизируется ЦУ до нуле-

вого уровня целей, выбирается первый момент времени, при котором координатная неопределенность выходит за пределы допустимых значений по фазовым координатам в пространстве состояний. Решение такой задачи уже связано с выходом на уровень планирования антропоморфного управления. Поэтому процесс конструирования ЦУ может быть итерационным, переходящим на уровень планирования антропоморфного управления и после решения задачи планирования с учетом неопределенностей возвращающимся на уровень ЦУ. В этом случае становится обоснованным применение "гипотезы полной определенности", сформулированной Н. Н. Моисеевым для оптимального программного управления объектом [22].

Заключение

В настоящее время ЦУ как верхний уровень совместного управления в СЧМ является малоисследованной темой в теории эргатических систем. В данной работе совместное управление, осуществляемое при взаимодействии ЧО и УА СЧМ, представлено вариантом ситуационного управления, построенного по модели действий и ответных реакций ЧО и машины, принятой в инженерной психологии. Исходной математической моделью такого управления, приближенного по свойствам к действиям ЧО, является множество неполных представлений элементарных движений СЧМ в пространстве состояний. Соответствующие элементарные действия ЧО целенаправлены, что предложено учесть и использовать в ЦУ, чтобы можно было сконструировать антропоморфное управление объектом СЧМ, которое осуществимо и ЧО, и УА. При этом возрастают преимущества ЧО и УА в организации управления СЧМ и ослабляются их недостатки. Таким образом, актуализируется задача распределения функций управления между ЧО и машиной, которая была сформулирована еще в самом начале развития теории эргатических систем "человек—машина".

Содержание ЦУ определено упорядоченной во времени иерархической системой целей со слабыми связями. Нижний уровень образует последовательность элементарных целей, которой соответствует последовательность элементарных движений СЧМ в пространстве состояний. Верхний уровень занимает генеральная (главная) цель над последовательностью элементарных целей. Промежуточные по уровням

цели достаточно информативны, поскольку, как показали экспериментальные исследования, они способствуют "взаимопониманию" во взаимодействии ЧО и УА СЧМ через человеко-машинный интерфейс. Конструирование ЦУ построено таким образом, что оно предусматривает возможность продолжения данного процесса в новом ЦУ на последующих интервалах времени на этапе жизненного цикла СЧМ. При этом учитываются параметрическая, сигнальная и координатная неопределенности используемых математических моделей и измерений фазовых координат.

Прикладной основой постановки и решения поставленной задачи послужили натурные эксперименты по изучению нескольких десятков управляемых процессов ввода судна в камеру шлюза в условиях повышенной опасности, управляющих действий судоводителей и целей, которые побуждают действия.

Список литературы

1. **Тырва В. О., Саушев А. В.** Аналитический подход к конструированию совместного управления движением эргатической системы "судоводитель—судно" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 9. С. 459—467.
2. **Ющенко А. С.** Человек и робот — совместимость и взаимодействие // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1 (2). С. 4—9.
3. **Endsley M. R.** The divergence of objective and subjective situation awareness: A meta-analysis // Journal of Cognitive Engineering and Decision Making. 2020. Vol. 14(1). P. 34—53.
4. **Тырва В. О., Саушев А. В.** О реализации совмещаемых управляющих воздействий на объект в системах "человек—машина" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. № 21 (5). С. 274—281.
5. **Tyrva V. O., Saushev A. V., Shergina O. V.** Anthropomorphic Control over Electromechanical System Motion: Simulation and Implementation // Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon. 2020. P. 374—379.
6. **Cataldi E.** Set-based inverse kinematics control of an anthropomorphic dual arm aerial manipulator // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE. 2019. P. 2960—2966.
7. **Lee H., Kim H. J.** Constraint-based cooperative control of multiple aerial manipulators for handling an unknown payload // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. Vol. 13, N. 6. P. 2780—2790.
8. **Jimenez-Cano A. E.** Modelling and control of an aerial manipulator consisting of an autonomous helicopter equipped with a multi-link robotic arm // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2016. Vol. 230, N. 10. P. 1860—1870.
9. **Поспелов Д. А.** Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука. Физ.мат.лит., 1986. 288 с.
10. **Суютинов С. И., Булдакова Т. И., Вишневская Ю. А.** Синергетическая модель ситуационной осведомленности человека-оператора в эргатических системах управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 6. С. 302—308. DOI: 10.17587/mau.23.302-308.

11. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 9. С. 563—578.

12. **Endsley M. R.** Situation Models: An Avenue to the Modeling of Mental Models // Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings. 2000. Vol. 44 (1). P. 61—64. DOI: 10.1177/154193120004400117.

13. **Ющенко А. С.** Ситуационное управление и робототехника // Материалы III Пospelовских чтений "Искусственный интеллект сегодня. Проблемы и перспективы". М., 2007. URL: <http://www.posp.raai.org/?arch> (дата обращения: 28.10.2019).

14. **Гарькина И. А., Данилов А. М., Нашивочников В. В.** Когнитивные модели эргамата // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 258.

15. **Корнев Г. В.** Цель и приспособляемость движения М.: Наука. 1974. 528 с.

16. **Тырва В. О.** Моделирование эргатической системы совместного управления движением судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2021. № 2 (66). С. 266—277.

17. **Тырва В. О.** Автоматизация эргатической системы "человек-машина" на основе применения в ней антропоморфного управления // Автоматизация в промышленно-сти. 2021. № 2. С. 3—7.

18. **Тырва В. О.** Применение математических моделей для коррекции дискретных сигналов управления объектом эргатической системы // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2014. Вып. 1 (29). С. 171—178.

19. **Тырва В. О.** Совместное управление объектом в эргатической системе: модели и реализации // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. № 2 (48). С. 430—443.

20. **Сурков А. В., Сухинин Б. В., Сурков В. В.** Количество интервалов управлений оптимальных по быстродействию систем // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 1. 2010. С. 138—148.

21. **Сухинин Б. В., Сурков В. В., Соловьев А. Э.** Синтез оптимальных по быстродействию систем на основании использования теоремы об интервалах управления // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2010. № 2 (20). С. 57—63.

22. **Моисеев Н. Н.** Элементы теории оптимальных систем М.: Наука, 1975. 526 с.

Targeting of Joint Control in the "Man-Machine" System: Modeling and Structuring

V. O. Tyrva, v.tyrva@mail.ru, A. V. Saushev, saushev@bk.ru,

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation

Corresponding author: **Tyrva Vladimir O.**, Cand. of Tech. Sc., Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: v.tyrva@mail.ru

Accepted on September 27, 2022

Abstract

The category of target designation is considered as the upper level of joint control of an object in the ergatic system "man-machine". Target designation refers to the initial need that precedes the planning and execution of the controlled movement of some object of the ergatic system. Such management is presented as a variant of situational management, defined by D. S. Pospelov on the basis of a model of actions and responses of a human operator and a machine adopted in engineering psychology. The control automaton of the system is given the properties inherent in the human operator. The anthropomorphism of control actions is used in the construction of the designation of the control automaton on a set of incomplete representations of elementary movements of the depicting point along the trajectory in the space of states of the "man-machine" system. It is shown that the angular points of the trajectory mark complete situations in the state space, the change of which is caused by signals of discrete anthropomorphic control. The change of situations and elementary movements are matched with the elementary goals and intermediate goals in a structured hierarchy of a complete system of target designation goals, arranged in time. Quantitative estimates of the complete system of goals were obtained. The principal possibility of structuring target designation at the entire stage of operation of the vital cycle of the "man-machine" system is shown. The description of the adopted approach to the design of target designation is accompanied by an example of the application of methods of the theory of optimal control and expert opinions and assessments of boatmasters for the organization of anthropomorphic control of the vessel's movement in conditions of increased danger. The results of the analysis of experimental data are presented, according to which quantitative estimates of the complete systems of goals implemented in the executed movements of ships are given when the main goal is achieved — the entry of the vessel into the lock chamber. The analogous estimates for comparison are made according to the patterns of anthropomorphic management developed for the same main purpose. The results of the discussion of the results of the study are presented. The possibilities of taking into account the parametric, signal and coordinate uncertainties of mathematical models for the coordination of target designation with the planning of anthropomorphic ship movement control are shown.

Keywords: ergatic system, goal, management, situation, state space, model, uncertainty, vessel

For citation:

Tyrva V. O., Saushev A. V. Targeting of Joint Control in the "Man-Machine" System: Modeling and Structuring, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 67—74.

DOI: 10.17587/mau.24.67-74

References

1. **Tyrva V. O., Saushev A. V.** Analytical approach to the design of joint motion control of the ergatic system "skipper-ship", *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 9, pp. 459–467 (in Russian)
2. **Yushchenko A. S.** Man and robot — compatibility and interaction, *Ro-bototekhnika and technical cybernetics*, 2014, no. 1 (2), pp. 4–9 (in Russian).
3. **Endsley M. R.** The divergence of objective and subjective situation awareness: A meta-analysis, *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 34–53.
4. **Tyrva V. O., Saushev A. V.** On the implementation of combined control actions on an object in man-machine systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 5, pp. 274–281 (in Russian).
5. **Tyrva V. O., Saushev A. V., Shergina O. V.** Anthropomorphic Control over Electromechanical System Motion: Simulation and Implementation, *Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon.*, 2020, pp. 374–379.
6. **Cataldi E.** Set-based inverse kinematics control of an anthropomorphic dual arm aerial manipulator, *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2019, pp. 2960–2966.
7. **Lee H., Kim H. J.** Constraint-based cooperative control of multiple aerial ma-nipulators for handling an unknown payload, *IEEE Transactions on Industrial Infor-matics*, 2017, vol. 13, no. 6, pp. 2780–2790.
8. **Jimenez-Cano A. E.** Modelling and control of an aerial manipulator consist-ing of an autonomous helicopter equipped with a multi-link robotic arm, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, vol. 230, no. 10, pp. 1860–1870.
9. **Pospelov D. A.** Situational management: theory and practice, Moscow, Nauka. Fiz.mat.lit., 1986, 288 p. (in Russian).
10. **Suyatinov S. I., Buldakova T. I., Vishnevskaya Yu. A.** Synergetic model of situational awareness of a human operator in ergatic systems of control of mobile objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 302–308, doi: 10.17587/mau.23.302-308 (in Russian).
11. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Situational approach in tasks of automation of control of technical objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 563–578 (in Russian).
12. **Endsley M. R.** Situation Models: An Avenue to the Modeling of Mental Models, *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 2000, vol. 44 (1), pp. 61–64, doi: 10.1177/154193120004400117/
13. **Yushchenko A. S.** Situational management and robotics // Materials of the III Pospelov readings "Artificial Intelligence today. Problems and prospects". Moscow, 2007, available at: <http://www.posp.raai.org/?arch> (accessed: 28.10.2019) (in Russian)
14. **Garkina I. A., Danilov A. M., Nashivochnikov V. V.** Cognitive models of ergamat, *Modern problems of science and education*, 2015, no. 1-1, p. 258 (in Russian).
15. **Korenev G. V.** Purpose and adaptability of movement, Moscow, Nauka, 1974, 528 p. (in Russian).
16. **Tyrva V. O.** Modeling of the ergatic system of joint vessel motion control, *Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of the Sea and River Fleet*, 2021, no. 2 (66), pp. 266–277 (in Russian).
17. **Tyrva V. O.** Automation of the ergatic system "man-machine" based on the application of anthropomorphic control in it, *Automation in industry*, 2021, no. 2, pp. 3–7 (in Russian).
18. **Tyrva V. O.** Application of mathematical models for correction of specific control signals of an ergatic system object, *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*, 2014, iss. 1 (29), pp. 171–178 (in Russian).
19. **Tyrva V. O.** Joint management of an object in an ergatic system: models and implementations, *Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet*, 2018, no. 2 (48), pp. 430–443 (in Russian).
20. **Surkov A. V., Sukhinin B. V., Surkov V. V.** Number of control intervals of optimal performance systems, *News of TulSU. Technical sciences*, 2010, iss. 1, pp. 138–148 (in Russian).
21. **Sukhinin B. V., Surkov V. V., Soloviev A. E.** Synthesis of optimal performance systems based on the use of the control interval theorem, *Conduct of higher educational institutions of the Chernozem region*, 2010, no. 2 (20)n pp. 57–63 (in Russian).
22. **Moiseev N. N.** Elements of the theory of optimal systems, Moscow, Nauka, 1975, 526 p. (in Russian).



29–31 мая 2023 г.

г. Санкт-Петербург, Россия

АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"



XXX Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам

Тематика конференции

- Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- Интегрированные системы навигации и управления движением
- Глобальные навигационные спутниковые системы
- Средства гравиметрической поддержки навигации

В рамках каждого направления рассматриваются:

- схемы построения и конструктивные особенности;
- методы и алгоритмы;
- особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные);
- испытания и метрология.

Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57

Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprib.ru

В. Б. Мелехин, д-р техн. наук, проф., pashka1602@rambler.ru,
Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала,
М. В. Хачумов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., khmike@ribox.ru,
Институт программных систем им. А. К. Айламазяна РАН, с. Веськово, Ярославская обл.,
Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН,
Российский университет дружбы народов, г. Москва

Принцип организации мотивационного поведения и автоматического целеполагания автономных интеллектуальных мобильных систем*

Обоснована целесообразность организации мотивационного поведения автономных интеллектуальных мобильных систем, ориентированных на решение различных сложных задач в нестабильных априори неописанных проблемных средах. Такая необходимость обусловлена тем, что данный вид целенаправленного поведения позволяет различным по назначению интеллектуальным системам обеспечить безопасную и результативную целенаправленную деятельность в нестабильных условиях функционирования.

Предложена модель представления знаний автономных интеллектуальных мобильных систем безотносительно к конкретной предметной области, построенная на основе активных нечетких семантических сетей. Вершины в таких сетях помечаются слотами, обладающими множеством характеристик, которые позволяют в процессе целенаправленной деятельности осуществлять пометку активных вершин объектами и происходящими в проблемной среде событиями, удовлетворяющими их требованиям. Ребра в таких сетях помечаются обобщенными нечетко заданными значениями отношений, которые должны выполняться в проблемной среде между автономной интеллектуальной мобильной системой, различными объектами и происходящими в среде событиями. Данная модель формализованного представления различных ситуаций и подsituаций проблемной среды позволяет интеллектуальным системам адаптироваться к априори неописанным условиям функционирования и на этой основе автоматически планировать целенаправленную деятельность в условиях неопределенности.

Для подсистемы самоорганизации и управления мотивационным поведением автономных интеллектуальных мобильных систем разработаны инструментальные средства идентификации возникающих в проблемной среде угроз безопасной и результативной деятельности. Построена оригинальная по содержанию обобщенная модель представления знаний продукционного типа безотносительно к конкретной предметной области, позволяющая интеллектуальным системам оперативно реагировать на возникающие в проблемной среде различного вида угрозы безопасности и сохранить на этой основе работоспособность в процессе выполнения сложных заданий в реальных проблемных средах.

В заключении обозначен один из эффективных путей дальнейшего развития предложенного принципа организации безопасной и результативной деятельности автономных интеллектуальных мобильных систем, связанный с управлением их коллективной деятельностью в процессе выполнения сложного задания при спонтанно происходящих в проблемной среде изменениях, сопровождающихся возникновением в ней различного вида угроз, препятствующих их эффективному совместному функционированию.

Ключевые слова: автономная интеллектуальная система, проблемная среда, условия неопределенности, угрозы безопасности, мотивационное поведение

Введение

Создание самоорганизующихся автономных интеллектуальных мобильных систем (АИМС) различного назначения является одной из актуальных проблем искусственного интеллекта. Необходимость разработки таких систем обусловлена тем, что построение подробной модели закономерностей нестабильной проблемной

среды (ПС), на основе которой АИМС способна автоматически планировать безопасную и результативную деятельность, на практике не представляется возможным [1]. В связи с этим АИМС в процессе решения сложных практических задач в условиях неопределенности может столкнуться с возникновением различного вида угроз безопасности и результативности целенаправленной деятельности, например, связанных, соответственно, с потерей работоспособности в текущих условиях функционирования и потерей возможности выполнения

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056>

по ряду причин сформулированного ей задания. Например, к таким угрозам безопасной деятельности следует отнести появление в ПС опасных для АИМС априори непредвиденных как подвижных, так и неподвижных объектов, а также негативно влияющих на функционирование интеллектуальной системы событий, возникающих в ПС.

Что же касается угроз результативности целенаправленной деятельности, то они, например, могут быть связаны с необходимостью преследования подвижного объекта, который в процессе планирования целенаправленной деятельности АИМС находился в неподвижном состоянии, и т. п.

Таким образом, проявление в ПС непредвиденных обстоятельств может сопровождаться возникновением у АИМС определенных потребностей, которые требуется удовлетворить для перехода в состояние, обеспечивающее возможность дальнейшей безопасной и результативной целенаправленной деятельности.

Одним из подходов к эффективному решению данной проблемы является разработка когнитивных инструментов самоорганизации и мотивационного поведения АИМС, а также связанное с ним автоматическое целеполагание.

В общем случае подсистема самоорганизации и управления мотивационным поведением АИМС включает следующие основные модули: анализатор состояния внутренней и внешней составляющих ПС, автоматический генератор подцелей мотивационного поведения, адекватных текущим условиям и заданной основной цели поведения, а также память, в которой хранится модель представления знаний.

Основная задача, решаемая анализатором состояний ПС, сводится к выработке адекватных мотивационных сигналов при возникновении в ПС условий, приводящих, например, к следующим негативным последствиям:

- потере работоспособности;
- возникновению непредвиденных событий и подвижных объектов, препятствующих достижению заданной цели;
- отсутствию инструментов или ресурсов, необходимых для достижения заданной цели поведения, и т. п.

Что же касается генератора подцелей поведения, то его задача, в соответствии с содержанием поступающих на вход мотивационных сигналов, сводится либо к назначению безусловных реакций, которые следует оперативно

отработать АИМС для удовлетворения возникшей потребности, связанной с устранением наблюдаемой в ПС угрозы, либо к автоматическому целеполаганию и планированию целенаправленной деятельности, связанной с достижением сформулированной подцели мотивационного поведения, обеспечивающей устранение наблюдаемой в ПС опасности.

Таким образом, для создания АИМС, способных эффективным образом целенаправленно действовать в априори неописанных нестабильных ПС, возникает необходимость в разработке инструментальных средств идентификации возникающих в ПС угроз безопасности и результативности, а также модели представления и обработки знаний для подсистемы самоорганизации и управления мотивационным поведением в изменившихся условиях функционирования.

Постановка задачи

В общем случае АИМС можно охарактеризовать как систему, способную обрабатывать множество действий $B = \{b_i\}$, $i_1 = \overline{1, n_1}$, связанных с ее перемещениями в ПС и целенаправленным манипулированием объектами, находящимися в среде. Выполняемые АИМС действия $b_i \in B$ в модели представления знаний, в соответствии с ее функциональным назначением и внешними условиями функционирования, определяются следующими тройками: $\langle S_i^I, b_i, S_i^P \rangle$ [2]. Здесь S_i^I — подситуация, определяющая в нечеткой форме представления условия в виде семантической сети, которые должны выполняться в ПС для успешной отработки действия b_i ; S_i^P — нечетко заданная подситуация, в которую преобразуется подситуация S_i^I в результате отработки АИМС действия b_i .

Описание в модели представления знаний обрабатываемых АИМС действий в формате $\langle S_i^I, b_i, S_i^P \rangle$ позволяет интеллектуальной системе автоматически планировать мотивационную целенаправленную деятельность путем построения дерева вывода решений [3, 4], каждая ветвь которого представляет собой кортеж элементарных актов поведения следующего вида [5]:

$$\begin{aligned} &\langle S_{i_1}^I(1), b_{i_1}^1 \rightarrow S_{i_1}^P(1) \approx S_{i_1}^I(2), b_{i_1}^2 \rightarrow S_{i_1}^P(2) \approx \\ &\approx \dots, \approx S_{i_1}^I(z), b_{i_1}^z \rightarrow S_{i_1}^P(z) \approx \\ &\approx \dots, \approx S_{i_1}^I(q), b_{i_1}^q \rightarrow S_{i_1}^P(q) \rangle, \end{aligned}$$

где $S_{i_1}^I(1)$, $S_{i_1}^P(q)$ — подситуации, которые являются нечетко вложенными в ситуации, соответственно определяющие исходное и целевое состояния ПС; $S_{i_1}^I(1), b_{i_1}^1 \rightarrow S_{i_1}^P(1)$ — элементарный акт поведения, означающий, что если семантическая сеть, определяющая текущую подситуацию ПС, включает подситуацию $S_{i_1}^I(1)$, то обрабатываемое АИМС действие $b_{i_1}^1$ приводит в среде к изменениям, определяемым подситуацией $S_{i_1}^P(1)$; $S_{i_1}^P(1) \approx S_{i_1}^I(2)$ — выражение, обозначающее нечеткое равенство между собой подситуаций $S_{i_1}^P(1)$ и $S_{i_1}^I(2)$ [6].

ПС можно охарактеризовать присутствующими в ней объектами $O = \{o_{i_2}(X_{i_1})\}, i_2 = \overline{1, n_2}$, семантическими отношениями $R = \{r_{i_4}(X_{i_4})\}, i_4 = \overline{1, n_4}$ [7], которые выполняются в ПС между данными объектами и происходящими независимо от деятельности интеллектуальной системы событиями $D = \{d_{i_3}(Y_{i_3})\}, i_3 = \overline{1, n_3}$. Здесь X_{i_1}, Y_{i_3} — соответственно множества характеристик объектов $o_{i_2}(X_{i_1}) \in O$ и событий $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, служащих для их идентификации АИМС в процессе целенаправленной деятельности; X_{i_4} — множество характеристик отношения $r_{i_4}(X_{i_4}) \in R$, описывающих его содержание и текущее значение. Например, если отношение $r_{i_4}(X_{i_4}) \in R$ является отношением пространства состояний, то оно может определять текущее или требуемое для достижения текущей подцели поведения местоположение в ПС объектов $o_{i_2}(X_{i_1}) \in O$ и АИМС относительно друг друга. Если же $r_{i_4}(X_{i_4}) \in R$ является, например, причинно-следственным отношением, то множество X_{i_4} может определять, например, характер влияния появляющихся в ПС событий $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$ на текущее состояние различных объектов ПС или АИМС.

Кроме того, ряд объектов $o_{i_2}(X_{i_1}) \in O$, находящихся в среде, может быть активным и в результате обрабатываемых ими различных действий $b_{j_1}^{i_2} \in B_{i_2}^*, B_{i_2}^* = \{b_{j_1}^{i_2}\}, j_1 = \overline{1, m_1}$, может вносить независимые от АИМС изменения в ее текущее состояние, где $B_{i_2}^*$ — множество действий, которые способен обрабатывать активный i_2 -й объект ПС. В связи с этим известные АИМС активные объекты ПС удобно определить парами $\langle X_{i_1}, B_{i_2}^* \rangle$ и обозначить их следующим образом: $o_{i_2} \langle X_{i_1}, B_{i_2}^* \rangle \in O$.

В общем случае появление в ПС различных событий $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, в соответствии с их характеристиками Y_{i_3} , может сопровождаться следующими изменениями в ПС:

— изменениями текущих состояний определенных объектов ПС $o_{i_2}(X_{i_1}) \in O$;

— появлением причинно-следственно связанных с ними других событий $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, которые, в свою очередь, приводят к определенным изменениям в ПС;

— возникновением возмущающих факторов, влияющих как на снижение работоспособности АИМС, так и приводящих к неисправностям в одной или нескольких ее подсистемах. Например, появление в ПС сильного дождя может привести к потере эффективной работоспособности интеллектуальной системы из-за грязи и т. п.

Что же касается активных объектов $o_{i_2} \langle X_{i_1}, B_{i_2}^* \rangle \in O$, то ими могут вноситься в текущее состояние ПС, например, следующие изменения:

— изменения состояний неподвижных объектов $o_{i_2}(X_{i_1}) \in O$ в результате обработки над ними различных действий $b_{j_1}^{i_2} \in B_{i_2}^*$;

— изменения значений отношений, которые наблюдаются между объектами в ПС после обработки определенного действия $b_{j_1}^{i_2} \in B_{i_2}^*$ и т. п.

Для формального представления различных допустимых ситуаций ПС $S = \{s_{i_5}\}, i_5 = \overline{1, n_5}$, в соответствии с их ролью, которую они играют в процессе принятия решений АИМС, целесообразно использовать активные нечеткие [2] и классические семантические сети [7]. Активные нечеткие семантические сети $s_{i_5}^a \in S$ служат для построения в обобщенном виде типовых элементов модели представления знаний и формального описания формулируемых АИМС безотносительно к конкретной предметной области целей поведения.

Формальное представление активных нечетких семантических сетей определяется помеченным графом $G^a = (V^a, E^a)$, где $V^a = \{v_{i_6}^a\}, i_6 = \overline{1, n_6}$, — множество активных вершин; $E^a = E_1^a \cup E_2^a$, $E_1^a = \{e_{i_7}^a\}, i_7 = \overline{1, n_7}$, $E_2^a = \{e_{i_8}^a\}, i_8 = \overline{1, n_8}$, — соответственно множества активных неориентированных и ориентированных ребер. Каждая активная вершина $v_{i_6}^a \in V^a$ в соответствии с ее содержанием помечается в семантической сети одним из следующих слотов: $o_{i_9}^*(X_{i_9}^*) \in O^*, i_9 = \overline{1, n_9}$, или $d_{i_{10}}^*(Y_{i_{10}}^*) \in D^*, i_{10} = \overline{1, n_{10}}$, где $X_{i_9}^*, Y_{i_{10}}^*$ — множества характеристик, которыми должны, соответственно, обладать конкретные объекты $o_{i_2}(X_{i_1}) \in O$ и события $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$ ПС для того, чтобы была допустимой пометка этих вершин ими в текущих условиях функционирования АИМС.

Иначе говоря, слоты $o_{i_9}^*(X_{i_9}^*) \in O^*$ и $d_{i_{10}}^*(Y_{i_{10}}^*) \in D^*$ могут быть помечены конкретными объектами $o_{i_2}(X_{i_1}) \in O$ и происходящими в ПС событиями $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, если для них, соответственно, выполняются условия $X_{i_9}^* \subseteq X_{i_1}$ и $Y_{i_{10}}^* \subseteq Y_{i_3}$.

Неориентированные ребра $e_{i_7}^a \in E_1^a$ в сети G^a определяются следующими тройками:

$$\langle T_{j_1}^*(r_{i_4}), (r_{j_1}^*, r_{j_1+1}^*) \rangle, j_1 = \overline{1, 5},$$

где $T_{j_1}^*(r_{i_4})$ — терм лингвистической переменной [8, 9] с названием, совпадающим с наименованием отношения $r_{i_4}(X_{i_4}) \in R$, которое должно выполняться в ПС между объектами или объектом и АИМС, определяющими пометки вершин, инцидентные этим ребрам; $(r_{j_1}^*, r_{j_1+1}^*)$ — соответственно нижняя и верхняя границы подынтервала численных значений термина $T_{j_1}^*(r_{i_4})$ на шкале количественных оценок лингвистической переменной, соответствующей отношению $r_{i_4}(X_{i_4}) \in R$.

В свою очередь, ориентированные ребра $e_{i_7}^a \in E_1^a$ помечаются следующими двойками: $\langle F_{j_2}, [t_{j_2}^1 - t_{j_2}^2] \rangle$, где F_{j_2} — множество характеристик, описывающих влияние событий $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, удовлетворяющих требованиям активных вершин $d_{i_{10}}^*(Y_{i_{10}}^*) \in D^*$, на АИМС или объекты ПС, определяющие вершины, в которые входят данные ребра; $[t_{j_2}^1 - t_{j_2}^2]$ — интервал времени t , в течение которого может проявиться результат влияния событий, определяемых слотом $d_{i_{10}}^*(Y_{i_{10}}^*) \in D^*$, на текущее состояние ПС.

Основная цель поведения формулируется АИМС в декларативной форме представления в виде активной нечеткой семантической сети $G_{\Pi}^a = (V_{\Pi}^a, E_{\Pi}^a)$. В этом случае активные вершины V_{Π}^a в сети G_{Π}^a помечаются слотами $\langle o_{i_9}^{**}, o_{i_9}^*(X_{i_9}^*) \rangle \in O^*$, а пометки ребер E_{Π}^a определяются аналогичным образом, как и в обычной активной нечеткой семантической сети. Здесь $o_{i_9}^{**}$ — состояние, в котором должен находиться объект ПС, удовлетворяющий требованиям слота $\langle o_{i_9}^{**}, o_{i_9}^*(X_{i_9}^*) \rangle$ исходя из заданной АИМС цели поведения.

Такое представление сформулированной АИМС цели поведения позволяет:

— использовать различные объекты, находящиеся в ПС для ее достижения, т. е. произвольные объекты $\langle o_{i_2}, o_{i_2}(X_{i_1}) \rangle \in O$, удовлетворяющие требованиям слотов $\langle o_{i_9}^{**}, o_{i_9}^*(X_{i_9}^*) \rangle$, входящих в структуру заданной цели, где o_{i_2} — текущее состояние объекта $o_{i_2}(X_{i_1}) \in O$;

— определять, достижима или нет заданная цель в текущих условиях функционирования (решение о том, что сформулированная АИМС цель поведения недостижима в текущей ситуации ПС, принимается в том случае, когда в ПС отсутствуют объекты, удовлетворяющие требованиям слотов в ее формальном описании);

— выполнять и использовать для вывода решений формальное описание в виде семантической сети только того участка ПС, на котором АИМС предстоит непосредственно функционировать для достижения заданной цели поведения.

При этом автоматическое формирование модели участка ПС, непосредственно связанного с достижением заданной цели, осуществляется в информационно-измерительной подсистеме АИМС и состоит из следующих этапов:

1. Все слоты $\langle o_{i_9}^{**}, o_{i_9}^*(X_{i_9}^*) \rangle$ в активной нечеткой семантической сети $G_{\Pi}^a = (V_{\Pi}^a, E_{\Pi}^a)$ пометить объектами $\langle o_{i_2}, o_{i_2}(X_{i_1}) \rangle$, находящимися в ПС и удовлетворяющими их требованиям.

2. Проверить условие "остались в сети $G_{\Pi}^a = (V_{\Pi}^a, E_{\Pi}^a)$ активные вершины, непомеченные объектами ПС": если условие выполняется, то принимается решение о том, что заданная цель является недостижимой на заданном участке ПС из-за отсутствия необходимых для этого объектов; в противном случае осуществляется переход на следующий этап формирования формального описания текущей подситуации ПС.

3. Определить количественные оценки r_{i_4} отношений $r_{i_4}(X_{i_4}) \in R$, которые выполняются в ПС между смежными объектами, которыми помечены слоты $\langle o_{i_9}^{**}, o_{i_9}^*(X_{i_9}^*) \rangle$ в сети $G_{\Pi}^a = (V_{\Pi}^a, E_{\Pi}^a)$.

В результате выполнения рассмотренных выше преобразований формируется семантическая сеть $G(t) = (V(t), E(t))$, определяющая формальное описание участка ПС, на котором предстоит функционировать АИМС для достижения заданной цели поведения. При этом в случае отсутствия на заданном участке ПС объекта $o_{i_2}(X_{i_1}) \in O$, например, исполняющего роль инструмента, необходимого для достижения заданной цели $G_{\Pi}^a = (V_{\Pi}^a, E_{\Pi}^a)$, у АИМС возникает мотив, связанный с необходимостью его поиска и расширения для этого поля своей дальнейшей деятельности.

Следует отметить, что полученное таким образом формальное описание текущей подситуации ПС регулярно корректируется в про-

цессе поведения АИМС с учетом возникающих и исчезающих в среде событий $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$.

После построения формального описания текущей подситуации ПС АИМС приступает к построению плана предстоящей деятельности в виде упорядоченной последовательности действий $b_{i_1} \in B$, отработка которых обеспечивает устранение всех имеющихся различий между текущей и целевой подситуациями ПС, найденными без учета происходящих в среде событий. Данные различия определяются путем сравнения между собой пометок структурно эквивалентных вершин и ребер в формальном описании подсетей $G(t)$ и $G_{ц}^a$, определяющих, соответственно, исходную и целевую подситуации ПС [10].

Таким образом, опираясь на вышеизложенные положения, связанные с организацией мотивационной деятельности АИМС, требуется разработать:

— инструментальные средства идентификации возникающих в ПС угроз безопасной и результативной деятельности;

— модель представления и обработки знаний подсистемы самоорганизации и управления мотивационной деятельностью АИМС, связанной с устранением проявляющихся в нестабильной ПС различного вида угроз безопасности и результативности.

Инструментальные средства управления мотивационным поведением АИМС

В общем случае модуль самоорганизации и управления мотивационным поведением АИМС функционирует следующим образом. Перед началом отработки АИМС построенного в интеллектуальном решателе задач плана целенаправленной деятельности в память анализатора угроз заносится модель исходной на текущий момент времени подситуации ПС. Затем в процессе отработки плана целенаправленной деятельности в описание этой модели вносятся все изменения, которые происходят в ПС в результате выполненных АИМС действий, связанных с достижением заданной цели поведения. После каждого самопроизвольного изменения текущих условий среды на вход анализатора модуля самоорганизации и управления мотивационным поведением из информационно-измерительной подсистемы АИМС поступает формальное описание текущей, самопроиз-

вольно изменившейся подситуации ПС. Данная подситуация сравнивается с подситуацией, хранящейся в памяти анализатора. По результатам такого сравнения устанавливаются имеющиеся между ними различия, которые рассматриваются как знаки, сигнализирующие АИМС о возможном наличии в ПС угрозы безопасности или результативной деятельности.

Полученные таким образом знаки на основе данных, хранящихся в модели представления знаний модуля самоорганизации и управления мотивационным поведением, проверяются на предмет того, являются они вестниками возникновения в ПС определенного вида угроз или нет. Если данные знаки относятся к сигнализирующим знакам, показывающим наличие в ПС соответствующих им угроз, то по их содержанию в анализаторе синтезируются связанные с ними мотивационные сигналы. Данные сигналы поступают на вход генератора мотивационных подцелей поведения АИМС. После этого подситуация, хранящаяся в анализаторе, заменяется на последнюю поступившую на его вход текущую подситуацию ПС. Далее функционирование анализатора продолжается в автоматическом режиме по вышеописанному принципу.

В генераторе подсистемы самоорганизации и управления мотивационным поведением, на основе поступившего на его вход мотивационного сигнала, синтезируется соответствующая ему подцель текущей деятельности АИМС, которая подается на вход ее решающей подсистемы. В решающей подсистеме АИМС полученная подцель мотивационного поведения анализируется, и в зависимости от содержания и условий ее достижения интеллектуальная система обрабатывает либо соответствующие ей безусловные реакции, либо планирует свое дальнейшее поведение, связанное с устранением возникшей в ПС угрозы.

Необходимо отметить, что если в анализаторе подсистемы самоорганизации и управления мотивационным поведением АИМС на малом промежутке времени Δt возникают несколько знаков, сигнализирующих о наличии в ПС угроз безопасности или результативной деятельности, то данные угрозы ранжируются в порядке роста степени их негативного влияния на текущую деятельность интеллектуальной системы. Затем в генераторе мотивационных подцелей поведения упорядоченные угрозы обрабатываются в последовательности, определяемой на основе относительного приоритета их устранения [11, 12].

В общем случае в качестве знаков, сигнализирующих АИМС в процессе целенаправленной деятельности о возникшей в ПС угрозе $c_{i_{11}} \in C, C = \{c_{i_{11}}\}, i_{11} = \overline{1, n_{11}}$ (C — множество возможных угроз безопасности и результативной деятельности), могут выступать следующие события:

1. Изменения состояний как отдельных $o_{i_2}(X_{i_1}, B_{i_2}^*)$, так и взаимосвязанных между собой объектов $o_{i_2}(X_{i_1}, B_{i_2}^*) \in O$ ПС, например, при их переходе из неподвижного в подвижное состояние. Для идентификации аналогичных друг другу сигнализирующих знаков такого типа, связанных с обеспечением безопасной или результативной деятельности АИМС, в модель представления знаний модуля самоорганизации и управления мотивационным поведением закладываются построенные в обобщенной форме представления следующие импликативные решающие правила:

$$\begin{aligned} o_{i_2}^{*j_2}(X_{i_2}^{*j_2}, B_{i_2, j_3}^*) : o_{i_2}^u \rightarrow o_{i_2}^t(b_{j_1}^{i_2}) \Rightarrow \\ \Rightarrow c_{i_{11}}^{j_2}(o_{i_2}^{*j_2}(X_{i_2}, b_{j_1}^{i_2}), p_{i_{12}}^{*i_2}), j_2 = \overline{1, m_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_2 — общее число слотов подвижных объектов ПС, которые могут стать виновниками возникновения угроз безопасной деятельности АИМС, определяемое мотивационным сигналом $p_{i_{12}}^{*j_2} \in P, i_{12} = \overline{1, n_{12}}; b_{j_1}^{i_2}$ — действие, которое выполняет активный объект $o_{i_2} \langle X_{i_1}, B_{i_2}^* \rangle \in O$, удовлетворяющий требованиям слота $o_{i_2}^{*j_2}(X_{i_2}^{*j_2}, b_{j_1}^{i_2})$, связанное с его переходом из исходного неподвижного $o_{i_2}^u$ в текущее $o_{i_2}^t$ подвижное состояние. Здесь P — множество различных мотивационных сигналов $p_{i_{12}}^{*j_2}$, вырабатываемых интеллектуальной системой при возникновении в ПС соответствующих им угроз $c_{i_{11}}^{j_2} \in C$.

Таким образом, на основе продукций (1) на выходе анализатора при поступлении на его вход сигнализирующего знака $o_{i_2}^u \rightarrow o_{i_2}^t(b_{j_1}^{i_2})$ формируется мотивационный сигнал в виде пары $\langle o_{i_2}^{*j_2}(X_{i_2}, b_{j_1}^{i_2}), c_{i_{11}}^{j_2}(p_{i_{12}}^{i_2}) \rangle$, где $o_{i_2}^u$ — состояние активного объекта $o_{i_2} \langle X_{i_1}, B_{i_2}^* \rangle$ в эталонной подситуации, хранящейся в памяти модуля самоорганизации и управления мотивационным поведением; $o_{i_2}^t(b_{j_1}^{i_2})$ — состояние объекта $o_{i_2} \langle X_{i_1}, B_{i_2}^* \rangle$, которое определяется на основе поступившей на вход анализатора текущей подситуации ПС.

Учитывая, что мотивационные сигналы $p_{i_{12}} \in P$ по своему содержанию и назначению могут соответствовать угрозам как безопас-

ной, так и результативной деятельности АИМС, множество $F_1 = \{f_{j_3}^1\}, j_3 = \overline{1, m_3}$, импликативных решающих правил (1) по своему назначению разбивается на два класса $F_1^1, F_1^2 \subset F_1, F_1^1 \cup F_1^2 = F_1$, где F_1^1, F_1^2 — подмножества импликативных решающих правил, соответственно связанных с идентификацией угроз безопасной и результативной деятельности АИМС. При этом выбор адекватного сложившимся в ПС условиям подмножества импликативных решающих правил F_1^1 или F_1^2 в процессе принятия решений зависит от содержания решаемой АИМС в текущий момент времени подзадачи. Если интеллектуальная система рассматривает подзадачу, в решении которой непосредственно участвует объект ПС $o_{i_2 j_3} \langle X_{i_2, j_3}, B_{i_2, j_3}^* \rangle$, изменивший свое состояние, то для идентификации мотивационного сигнала $p_{i_{12}} \in P$ используется подмножество импликативных решающих правил F_1^2 .

Кроме того, подмножество $O^{**} \subset O, O^{**} = \{o_{i_2 j_3} \langle X_{i_2, j_3}, B_{i_2, j_3}^* \rangle\}$ известных АИМС активных объектов ПС целесообразно разбить на классы эквивалентности в соответствии со связанными с ними угрозами $c_{i_{11}}^{j_3} \in C$ и мотивационными сигналами $p_{i_{12}}^{j_3} \in P$.

В совокупности проведенные таким образом разбиения множеств F_1 и O^{**} позволяют упорядочить реакции как анализатора, так и генератора мотивационных подцелей поведения подсистемы самоорганизации и мотивационного поведения на поступающие на их вход сигналы. В свою очередь, это обеспечивает возможность упорядочить хранящиеся в их памяти знания и на этой основе сократить число переборных, выполняемых в процессе поиска импликативных решающих правил вывода $f_{j_3}^1 \in F_1$, адекватных изменившимся условиям ПС.

2. Появляющиеся в ПС события $d_{i_3}(Y_{i_3}) \in D$, приводящие, например, к пожару. Для выработки мотивационного сигнала в анализаторе при наличии в ПС сигнализирующих знаков в виде отдельных событий используются следующие импликативные решающие правила, хранящиеся в модели представления знаний модуля самоорганизации и управления мотивационным поведением АИМС:

$$d_{i_{10}}^*(Y_{i_{10}}) : d_{i_3}(Y_{i_3}) \xrightarrow{i_3} c_{i_{11}}(p_{i_{12}}). \quad (2)$$

Данные правила вывода означают, что при появлении в ПС события $d_{i_3}(Y_{i_3})$, удовлетворяющего требованиям слота $d_{i_{10}}^*(Y_{i_{10}})$, в течение

промежутка времени t_{i_3} возникает угроза $c_{i_{11}} \in C$, которая вызывает у АИМС мотивационный сигнал $p_{i_{12}} \in P$.

3. Возникающие в ПС друг за другом различные события, связанные между собой причинно-следственным образом во времени. Для идентификации такого вида угроз и выработки связанных с ними мотивационных сигналов используются импликативные решающие правила следующего вида:

$$\begin{aligned} <d_{i_{10}}^{1*}(Y_{i_{10}}^*) \rightarrow \dots \rightarrow d_{i_{10}}^{k*}(Y_{i_{10}}^*)>_{j_4} : <d_{i_3}^1(Y_{i_3}^1) \rightarrow \\ \rightarrow \dots \rightarrow d_{i_3}^k(Y_{i_3}^k)>_{j_4} \Rightarrow c_{i_{11}}^{j_4}(d_{i_3}^k(Y_{i_3}^k), p_{i_{12}}^{j_4}), \quad (3) \\ j_4 = \overline{1, m_4}, \end{aligned}$$

где $d_{i_3}^1(Y_{i_3}^1), \dots, d_{i_3}^k(Y_{i_3}^k)$ — происходящие друг за другом события, которые, с одной стороны, причинно-следственно связаны между собой, а с другой стороны, удовлетворяют требованиям слотов $d_{i_{10}}^{1*}(Y_{i_{10}}^*), \dots, d_{i_{10}}^{k*}(Y_{i_{10}}^*)$; $d_{i_3}^k(Y_{i_3}^k)$ — событие, которое непосредственно приводит к возникновению в ПС угрозы $c_{i_{11}}^{j_4} \in C$, вызывающей у АИМС мотивационный сигнал $p_{i_{12}}^{j_4} \in P$; t — отрезок времени, по истечении которого в ПС возникает событие $d_{i_3}^k(Y_{i_3}^k)$ после появления в ней события $d_{i_3}^{1*}(Y_{i_3}^*)$.

4.1. Изменение по различным независимым от АИМС причинам значений отношений между объектами ПС $o_{i_2}^1(X_{i_2}^1), o_{i_2}^2(X_{i_2}^2) \in O$, которые удовлетворяют требованиям слотов в их обобщенном представлении $o_{i_9}^{*1}(X_{i_9}^{*1}) < T_{j_1}^*(r_{i_4}), (r_{j_1}^*, r_{j_1+1}^*) > o_{i_9}^{*2}(X_{i_9}^{*2})$. Например, изменение отношения пространства состояний $r_{i_4} \in R$ между объектами ПС, при котором возникает возможность падения одного объекта, расположенного на другом объекте, под воздействием ветра. Для идентификации каждой подобной угрозы и связанного с ней мотивационного сигнала в модели представления знаний АИМС в обобщенном виде хранятся следующие импликативные решающие правила:

$$\begin{aligned} d_{i_{10}}^{*j_5}(Y_{i_{10}}^*) : o_{i_9}^{*1}(X_{i_9}^{*1}) < T_{j_1}^*(r_{i_4}), (r_{j_1}^*, r_{j_1+1}^*) > o_{i_9}^{*2}(X_{i_9}^{*2}) \Rightarrow \\ \Rightarrow c_{i_{11}}^{j_5}(d_{i_3}(Y_{i_3}), r_{i_4}^*, p_{i_{12}}^{j_5}), j_5 = \overline{1, m_5}, \quad (4) \end{aligned}$$

где $d_{i_3}(Y_{i_3})$ — событие ПС, которое удовлетворяет требованиям слота $d_{i_{10}}^{*j_5}(Y_{i_{10}}^*)$ и связано с угрозой $c_{i_{11}}^{j_5} \in C$, вызывающей у АИМС мотивационный сигнал $p_{i_{12}}^{j_5} \in P$; $r_{i_4}^*$ — измененное значение отношения $r_{i_4} \in R$, полученное в результате появления в ПС события $d_{i_3}(Y_{i_3})$,

которое удовлетворяет условию $r_{i_4}^* \in (r_{j_1}^*, r_{j_1+1}^*)$, т. е. попадает в подынтервал численных значений $(r_{j_1}^*, r_{j_1+1}^*)$.

4.2. Появление в ПС активных объектов, удовлетворяющих требованиям слота $o_{i_2}^{*j_6}(X_{i_2}^{*j_6}, B_{i_2}^{*j_6})$, действия которых могут привести к изменению значений отношений между объектами ПС и АИМС. Для идентификации такого характера угроз и определения соответствующих им мотивационных сигналов строятся импликативные решающие правила следующего вида:

$$\begin{aligned} o_{i_2}^{*j_6}(X_{i_2}^{*j_6}, B_{i_2}^{*j_6}) : \\ o_{i_9}^{*1}(X_{i_9}^{*1}) < T_{j_1}^*(r_{i_4}), (r_{j_1}^*, r_{j_1+1}^*) > o_{i_9}^{*2}(X_{i_9}^{*2}) \Rightarrow \\ \Rightarrow (c_{i_9}^{j_6}(o_{i_2}^{j_6}(X_{i_2}^{j_2}, b_{j_1}^{i_2})), r_{i_4}^*, p_{i_{12}}^{j_6}), j_6 = \overline{1, m_6}, \quad (5) \end{aligned}$$

где $o_{i_2}^{j_6}(X_{i_2}^{j_2}, b_{j_1}^{i_2})$ — активный объект ПС, удовлетворяющий требованиям слота $o_{i_2}^{*j_6}(X_{i_2}^{*j_6}, B_{i_2}^{*j_6})$; $b_{j_1}^{i_2} \in B_{i_2}^{*j_6}$ — действие, в результате отработки которого активным объектом произошло изменение значения отношения $r_{i_4} \in R$; $r_{i_4}^*$ — текущее или измененное значение отношения $r_{i_4} \in R$ между объектами ПС, удовлетворяющими требованиям слотов $o_{i_9}^{*1}(X_{i_9}^{*1})$ и $o_{i_9}^{*2}(X_{i_9}^{*2})$.

5. Отдельные фрагменты $G^*(t) \subset G(t)$ текущих подситуаций ПС $G(t)$, в которых отражено местоположение АИМС, находящейся на близком расстоянии от опасных объектов, например, обрывов и т. п. В целях идентификации такого вида угроз в модели представления знаний анализатора используются импликативные решающие правила следующего вида:

$$\begin{aligned} \text{АИМС} : <\text{АИМС} < T_{j_1}^*(r_{i_4}), (r_{j_1}^*, r_{j_1+1}^*) > o_{i_9}^{*j_7}(X_{i_9}^{*j_7}) > \Rightarrow \\ \Rightarrow c_{i_{11}}^{j_7}(o_{i_2}^{j_7}(X_{i_2}^{j_27}), r_{i_4}^*, p_{i_{12}}^{j_7}), j_7 = \overline{1, m_7}, \quad (6) \end{aligned}$$

где $T_{j_1}^*(r_{i_4})$ — терм лингвистической переменной, одноименной с отношением $r_{i_4} \in R$, которому соответствует подынтервал $(r_{j_1}^*, r_{j_1+1}^*)$, определяющий опасные расстояния между АИМС и объектами $o_{i_2}^{j_7}(X_{i_2}^{j_27})$, удовлетворяющими требованиям слота $o_{i_9}^{*j_7}(X_{i_9}^{*j_7})$; $r_{i_4}^*$ — недопустимое расстояние между АИМС и опасным объектом в текущей ситуации ПС.

Необходимо отметить, что импликативные решающие правила (2)–(6) аналогичным образом, как и правила вывода (1), упорядочиваются и хранятся в модели представления знаний модуля самоорганизации и управления мотивационным поведением АИМС в целях

сокращения числа переборов в процессе автоматического целеполагания, связанного с мотивационным поведением интеллектуальной системы в изменившихся условиях ПС.

Следует также отметить, что авторы статьи не претендуют на полноту множества угроз S , на основе которых автоматически формируются сигналы мотивационного поведения АИМС в нестабильных условиях ПС. В статье предлагается, на основе ряда важных примеров, принцип построения типовых элементов модели представления знаний безотносительно конкретной предметной области в модуле самоорганизации и управления мотивационным поведением АИМС в самопроизвольно изменяющихся условиях функционирования.

Автоматическая постановка подцелей мотивационной деятельности АИМС осуществляется в генераторе подсистемы самоорганизации и управления мотивационным поведением на основе мотивационных сигналов $p_{i_{12}} \in P$, поступающих на его вход из анализатора возникающих в ПС самопроизвольных изменений.

В общем случае, как уже отмечалось ранее, мотивационные сигналы $p_{i_{12}} \in P$ могут быть следующих двух видов:

— сигналы $p_{j_{12}}(1) \in P$, $j_{12} = \overline{1, m_{12}}$, вызывающие у АИМС соответствующие им безусловные реакции $B_{j_{12}}^* \subset B$, $j_{12} = \overline{1, m_{12}}$, представляющие собой упорядоченную последовательность действий $\langle b_{j_1}^1, b_{j_1}^2, \dots, b_{j_1}^k, \dots, b_{j_1}^{m^*} \rangle$, отработка которых позволяет избежать последствий, связанных с возникшей в ПС угрозой безопасной деятельности, например "отойти на безопасное расстояние от обрыва" и т. п.;

— сигналы $p_{j_{12}}(2) \in P$, связанные с обеспечением результативной деятельности АИМС в изменившихся условиях ПС путем достижения соответствующей этим сигналам подцели мотивационного поведения. В этом случае мотивационная подцель поведения определяется в процедурной форме представления в виде кортежа сложных действий $\langle B_{j_{12}}^1, B_{j_{12}}^2, \dots, B_{j_{12}}^k, \dots, B_{j_{12}}^{m^*} \rangle$ [13], каждое из которых состоит из заданной последовательности элементарных операций и действий $b_{i_1} \in B$. Например, сложное действие $B_{j_{12}}^1$ "догнать объект $o_{i_2}^{*j_2}(X_{i_2}^{*j_2}, B_{i_2}^{j_2})$ " представляет собой упорядоченную последовательность следующих элементарных операций и действий: $B_{i_{12}}^1$ <определить скорость движения объекта, рассчитать координаты точки встречи с объектом, построить маршрут движения к точке встречи

с объектом, выполнить движение по заданному маршруту к точке встречи с объектом > [14].

Таким образом, модель представления таких знаний в модуле самоорганизации и управления мотивационным поведением АИМС состоит из множества имплицитивных решающих правил следующего вида:

$$f_{i_{12}}^1 : p_{i_{12}}(1) \Rightarrow \langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^k, \dots, b_{i_1}^{m^*} \rangle_{i_{12}}$$

$$\text{и } f_{j_{13}}^2 : p_{j_{13}}(2) \Rightarrow \langle B_{i_{12}}^1, B_{i_{12}}^2, \dots, B_{i_{12}}^k, \dots, B_{i_{12}}^{m^*} \rangle_{i_{12}}^2,$$

на основе которых интеллектуальная система планирует мотивационное поведение, связанное с устранением в ПС возникшей угрозы. Данные правила и мотивационные подцели поведения поступают на вход интеллектуального решателя задач АИМС, в котором с учетом сложившейся в ПС текущей подситуации определяются условия выполнения входящих в их структуру действий.

Резюмируя вышеизложенное, необходимо отметить, что для устранения угроз, определяющихся сложными по своей структуре мотивационными сигналами, например в виде семантических сетей, в решающей подсистеме интеллектуальной системы на основе комбинирования различных рассмотренных выше имплицитивных решающих правил автоматически синтезируются логико-трансформационные решающие правила ситуационного управления [15] мотивационной деятельностью АИМС.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сформулировать следующие основные выводы.

1. Предложенный принцип организации мотивационного поведения позволяет различным по назначению АИМС обеспечить безопасную и результативную целенаправленную деятельность в сложных нестабильных априори неописанных ПС.

2. Применение активных нечетких семантических сетей для описания условий успешной отработки действий и получаемых на их основе результатов, а также заданных в декларативной форме представления целей поведения позволяет АИМС адаптироваться к конкретным условиям функционирования и на этой

основе планировать свою целенаправленную деятельность в априори неописанных ПС.

3. Разработанная модель представления знаний безотносительно конкретной предметной области продукционного типа в подсистеме самоорганизации и управления мотивационным поведением позволяет АИМС адаптироваться к априори неописанным, меняющимся во времени условиям функционирования и на этой основе выполнять сложные задания в реальных ПС.

4. Дальнейшее развитие предложенного принципа организации безопасной и результативной деятельности АИМС связано с управлением коллективным выполнением интеллектуальными системами различного назначения сложного задания при спонтанных изменениях, происходящих в ПС, сопровождающихся возникновением в среде различных угроз, связанных с их совместным функционированием.

Список литературы

1. Каляев А. В., Чернухин Ю. В., Носков В. Н., Каляев И. А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990. 152 с.
2. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Инструментальные средства управления целесообразным поведением самоорганизующихся автономных интеллектуальных агентов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 4. С. 171–180.
3. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4 ed. Pearson, 2020. 1216 p.
4. Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 808 p.

5. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Планирование поведения интеллектуального беспилотного летательного аппарата в недоопределенной проблемной среде. Часть 2. Структура и применение фреймов действий // Искусственный интеллект и принятие решения. 2018. № 2. С. 46–56.

6. Melekhin V. B., Khachumov M. V. Fuzzy semantic networks as an adaptive model of knowledge representation of autonomous intelligent systems // Scientific and Technical Information Processing. 2021. Vol. 48, No. 5. P. 333–341.

7. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 284 с.

8. Zaden L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Part I: Information Sciences. 1975. Vol. 8. P. 199–249; Part II: Information Sciences. 1975. Vol. 8. P. 301–357; Part III: Information Sciences. 1975. Vol. 9. P. 43–80.

9. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control. Boston (USA): Addison Wesley Longman, 1998. 522 p.

10. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Планирование поведения автономных интеллектуальных мобильных систем в условиях неопределенности / Под ред. проф. Хачумова В. М. СПб.: Политехника, 2022. 276 с.

11. Martens-Atyushev D. S. Experimental study of a reconfigurable system with hardware task manager and a distributed queue // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2019. No. 16(7). P. 3040–3045.

12. Alfa A. S. Matrix-geometric solution of discrete time MAP/PH/1 priority queue // Naval Research Logistics. 1998. Vol. 45, No. 1. P. 23–50.

13. Мелехин В. Б., Хачумов В. М. Элементы понятийного мышления в планировании поведения автономных интеллектуальных агентов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 8. С. 411–419.

14. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Планирование маршрута целенаправленного полета автономного летательного аппарата на низкой высоте в условиях неопределенности // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 1. С. 18–27.

15. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Ситуационный подход в задачах автоматизированного управления техническими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 9. С. 562–578.

The Principle of Organization of Motivational Behavior and Automatic Goal Setting of Autonomous Intelligent Mobile Systems

V. B. Melekhin, pashka1602@rambler.ru,

Dagestan State Technical University, Makhachkala, 367015, Russian Federation,

M. V. Khachumov, khmike@inbox.ru,

Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Veskovo, 152021, Russian Federation,

Federal Research Center "Computer Science and Control", Moscow, 117313, Russian Federation,

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198, Russian Federation

Corresponding author: Melekhin Vladimir B., Dr. Sc. (Technology), Professor, Dagestan State Technical University, Makhachkala, 367015, Russian Federation, e-mail: pashka1602@rambler.ru

Accepted on September 27, 2022

Abstract

The expediency of organizing the motivational behavior of autonomous intelligent mobile systems focused on solving various complex problems in unstable a priori undescribed problematic environments is substantiated. That need is due to the fact that this type of goal-seeking behavior allows intelligent systems of various purposes to ensure safe and efficient activity in unstable operating conditions. A model of knowledge representation of autonomous intelligent mobile systems is proposed without regard to a specific subject area and built on the basis of active fuzzy semantic networks. In such networks, vertices are labeled with slots that have many characteristics, which enables in the process of goal-seeking activity to label active vertices with objects and events occurring in the problematic environment that meet their requirements. Edges in such networks

are labeled with generalized fuzzy values of corresponding conditions that must be met in a problematic environment between an autonomous intelligent mobile system, various objects, and occurring events. This model of a formalized description of various situations and subsituations of the problematic environment allows intelligent systems to adapt to a priori undescribed operating conditions and, on this basis, automatically plan goal-seeking activities under conditions of uncertainty. To control the motivational behavior and self-organization of autonomous intelligent mobile systems, tools have been developed intended to identify threats to productive activities that arise in a problematic environment. A generalized production-based model of knowledge representation has been built without regard to a specific subject area, which allows intelligent systems to quickly respond to various types of security threats that arise in a problematic environment and maintain operability in the process of performing complex tasks. In conclusion, one of the effective ways of further development of the proposed principle of organizing the safe and efficient operation of autonomous intelligent mobile systems is outlined, which is related to the management of their collective activities in the process of performing a complex task with changes occurring spontaneously in a problem environment, accompanied by the emergence of various types of threats in it that prevent their effective operation.

Keywords: autonomous intelligent system, problematic environment, uncertainty conditions, security threats, motivational behavior

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation, Grant number 21-71-10056 (<https://rscf.ru/en/project/21-71-10056/>)

For citation:

Melekhin V. B., Khachumov M. V. The Principle of Organization of Motivational Behavior and Automatic Goal Setting of Autonomous Intelligent Mobile Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 75–84.

DOI: 10.17587/mau.24.75-84

References

1. Kalyaev A. V., Chernuhin Yu. V., Noskov V. N., Kalyaev I. A. Homogeneous control structures of adaptive robots, Moscow, Nauka, 1990, 152 p. (in Russian)
2. Melekhin V. B., Hachumov M. V. Instrumental means of controlling the expedient behavior of self-organizing autonomous intelligent agents, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 171–180 (in Russian).
3. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach, Pearson, 2020, 1216 p.
4. Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods, Cambridge, Cambridge University Press, 2013, 808 p.
5. Melekhin V. B., Hachumov M. V. Planning the behavior of an intelligent unmanned aerial vehicle in an undefined problem environment. Part 2. Structure and application of action frames, *Iskusstvennyj intellekt i prinyatie resheniya*, 2018, no. 2, pp. 46–56 (in Russian).
6. Melekhin V. B., Khachumov M. V. Fuzzy semantic networks as an adaptive model of knowledge representation of autonomous intelligent systems, *Scientific and Technical Information Processing*, 2021, vol. 48, no. 5, pp. 333–341.
7. Pospelov D. A. Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika, Moscow, Nauka, 1986, 284 p. (in Russian).
8. Zaden L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Part I: Information Sciences, 1975, vol. 8, pp. 199–249; Part II: Information Sciences, 1975, vol. 8, pp. 301–357; Part III: Information Sciences, 1975, vol. 9, pp. 43–80.
9. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control, Boston (USA), Addison Wesley Longman, 1998, 522 p.
10. Melekhin V. B., Hachumov M. V. Planning the behavior of autonomous intelligent mobile systems under uncertainty, St. Petersburg, POLITEHNICA, 2022, 276 p. (in Russian).
11. Martens-Atyushev D. S. Experimental study of a reconfigurable system with hardware task manager and a distributed queue, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2019, no. 16(7), pp. 3040–3045.
12. Alfa A. S. Matrix-geometric solution of discrete time MAP/PH/1 priority queue, *Naval Research Logistics*, 1998, vol. 45, no. 1, pp. 23–50.
13. Melekhin V. B., Hachumov V. M. Elements of conceptual thinking in planning the behavior of autonomous intelligent agents *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 8, pp. 411–419 (in Russian).
14. Melekhin V. B., Hachumov M. V. Planning the route of a purposeful flight of an autonomous aircraft at low altitude in conditions of uncertainty, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2018, no. 1, pp. 18–27 (in Russian).
15. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Situational approach in the tasks of automated control of technical objects, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 562–578 (in Russian).

21–24 марта 2023 г.

Юбилейная XXV конференция молодых ученых "НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ"

г. Санкт-Петербург, Россия,
АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»

В формат конференции включаются обзорные лекции ведущих ученых в области теории и практики построения современных систем навигации и управления движением и доклады участников конференции.

Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57
Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: kmu@eprib.ru, kmu_elprib@mail.ru

А. Р. Гайдук, д-р техн. наук, проф., gaiduk_2003@mail.ru, Д. С. Лукин, аспирант, dlukin@sfnu.ru, ФГАОУ ВО Южный федеральный университет, г. Таганрог

Синтез нелинейных систем управления автороботами

В настоящее время роботы различных типов все шире применяются для решения различных задач. Чаще всего это мобильные роботы, перемещающиеся по поверхности в процессе выполнения поставленных задач, в частности, четырехколесные роботы, подобные автомобилю, — автороботы. Как объекты управления роботы являются существенно нелинейными, что требует применения нелинейных методов синтеза систем управления. В то же время применение традиционных методов синтеза нелинейных систем управления затруднено сложным видом нелинейностей в уравнениях мобильных роботов, в том числе и автороботов. В данной работе задача синтеза решается с применением дискретно-непрерывной квазилинейной модели, которая создается на основе нелинейных дифференциальных уравнений авторобота в форме Коши. Из-за большой сложности нелинейностей уравнений авторобота соответствующая квазилинейная модель создается численным методом. Квазилинейная модель, полученная этим методом, является дискретно-непрерывной и управляемой, а ее переменные состояния доступны измерению. Дискретная система управления автороботом включает две практически независимые подсистемы управления: продольной скоростью и поворотами. Для управления скоростью применяется дискретный ПИ закон управления, а дискретная подсистема управления поворотами синтезируется методом желаемой динамики. Полученная система управления автороботом обеспечивает устойчивое движение по траектории, которая может быть задана как функция времени или как функция координат положения движущегося авторобота.

Предложенный подход может применяться для синтеза систем управления нелинейными объектами различного назначения со сложными дифференцируемыми нелинейностями. Однако задача синтеза имеет решение, если соответствующая дискретно-непрерывная квазилинейная модель объекта является управляемой, а переменные состояния доступны измерению.

Ключевые слова: объект управления, нелинейность, дискретно-непрерывная квазилинейная модель, продольное движение, поворот, закон управления, дискретная система управления

Введение

Роботизация различных производственных и бытовых процессов приобретает все более широкое распространение. На сегодняшний день насчитываются миллионы роботов самого различного назначения: исследовательские, бытовые, медицинские, военные, промышленные и т. д. Наиболее широко распространены, по-видимому, являются наземные мобильные роботы, совершающие перемещение по некоторой поверхности при решении поставленных задач. Такие роботы должны двигаться по довольно сложным траекториям, включающим прямолинейные и криволинейные участки, поэтому их конструкция должна допускать возможность движения с различной скоростью и совершения поворотов на произвольные углы, обусловленные заданной траекторией. Этими возможностями обладают четырехколесные роботы автомобильного типа (автороботы). Как и другие автономные мобильные роботы, автороботы являются нелинейными объектами управления, и для их эксплуатации необходимы соответствующие системы автоматического управления [1–5].

К настоящему времени разработано множество различных подходов к решению за-

дачи синтеза систем управления движением автономных мобильных роботов. В работе [1] представлена адаптивная система управления колесным балансирующим роботом, синтезированная с применением второго метода Ляпунова. При этом предполагается, что робот описывается уравнениями "перевернутого маятника" с неизвестными параметрами. В разработанной адаптивной системе управления используется оптимальный LQ-регулятор, параметры которого определяются с использованием текущей эталонной модели объекта, что требует выполнения большого числа вычислительных операций.

Система управления колесным роботом, синтезированная методом интеллектуальной эволюции, рассмотрена в работе [2]. В этой системе периодически с помощью генетического алгоритма генерируется множество возможных управлений, из которых выбирается Парето-оптимальное управление. Применение этого управления в течение нескольких периодов позволяет осуществить генерацию нового множества улучшенных управлений путем скрещивания, мутаций и отбора. Достоинством данного подхода является возможность учета изменений условий движения робота, а также неопределенности математи-

ческой модели самого робота, что повышает точность его движения по заданной траектории. Однако оперативная обработка большого объема информации требует применения вычислительных средств чрезвычайно высокого быстродействия.

Известный метод бэкстеппинга используется в статье [3] для построения системы управления с измерителем внешнего возмущения на основе модели мобильного колесного робота, описанной в работе [4]. Сложность этого подхода в том, что он может быть применен только в том случае, если нелинейные уравнения робота удалось представить в "треугольной" форме. Аналогично трудность применения других известных методов синтеза нелинейных систем управления, таких как преобразование уравнений объекта к линейной канонической форме Бруновского [6, 7], приведение к регулярной форме [8], метод пассивации [9], позиционно-траекторный метод [10], метод управляемой формы Жордана [11], также обусловлена необходимостью приведения исходных уравнений мобильных роботов к специальным формам.

В данной работе синтез системы управления осуществляется на основе дискретно-непрерывной квазилинейной модели авторобота, которая создается на основе нелинейных уравнений в форме Коши численным методом, предложенным в работе [12]. Для применения этого метода необходима только дифференцируемость нелинейностей исходных уравнений робота. Если полученная модель является управляемой, а переменные состояния измеряемыми, то обычными методами теории управления легко находится дискретный нелинейный закон управления движением авторобота [13]. В процессе синтеза системы управления учитываются условия реализуемости, поэтому в данном случае полученный закон легко реализуется на микроконтроллере. Некоторым недостатком использования дискретно-непрерывной модели является довольно большой объем вычислительных операций. Это связано с зависимостью коэффициентов этой модели от переменных состояния объекта управления, обусловленной нелинейным характером его исходных уравнений. Однако в настоящее время этот недостаток преодолевается применением многопроцессорных микроконтроллеров с операционными системами, ориентированными на параллельные вычисления [14].

Постановка задачи

На рис. 1 представлены неподвижная O_nXY и подвижная Oxy системы координат, а также в упрощенном виде силы, действующие на авторобот. Продольные силы F_{ij} создаются силами трения при вращении колес за счет передачи им вращающего момента от двигателя; боковые силы S_{ij} являются следствием взаимодействия кузова и упругих шин движущегося авторобота с дорогой [5, 15–17]. Как и в автомобилях, скорость авторобота управляется изменением силы тяги двигателя, а изменение направления движения — поворотом передних колес в вертикальной плоскости.

Математическая модель движений авторобота (рис. 1) по некоторой поверхности с некоторыми упрощениями может быть представлена [15, 16] в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{V}_n = m^{-1}[F_1 \cos(\beta - \delta) + S_1 \sin(\beta - \delta) + F_2 \cos \beta + S_2 \sin \beta - c_v V_n^2]; \quad (1)$$

$$\ddot{\psi} = I_z^{-1} \left[L_1(S_1 \cos \delta + F_1 \sin \delta) - L_2 S_2 + \frac{e}{2} \tilde{S}_1 \sin \delta - c_\psi \dot{\psi}^2 \right]; \quad (2)$$

$$\dot{\beta} = (mV)^{-1} [-F_1 \sin(\beta - \delta) + S_1 \cos(\beta - \delta) + S_2 \cos \beta] - \dot{\psi}; \quad (3)$$

$$\dot{X} = V_n \cos(\psi + \beta); \quad \dot{Y} = V_n \sin(\psi + \beta), \quad (4)$$

где V_n — продольная скорость авторобота; δ — угол поворота передних колес в вертикальной

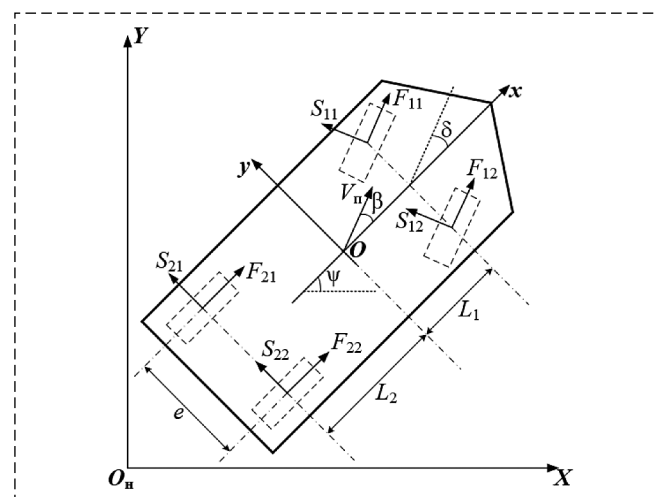


Рис. 1. Системы координат, параметры и силы модели авторобота

Fig. 1. Coordinate systems, parameters and forces of the autorobot model

плоскости; ψ и $\dot{\psi}$ — угол курса и скорость его изменения; β — угол между осью x и вектором скорости V_{Π} ; $F_i = F_{i1} + F_{i2}$, $S_i = S_{i1} + S_{i2}$, $i = 1, 2$; $\tilde{S}_1 = S_{11} - S_{12}$; F_{ij} и S_{ij} — продольные и боковые силы, действующие на колеса ($i = 1, 2$ — передние, задние; $j = 1, 2$ — левые, правые, соответственно); m — масса авторобота; I_z — момент инерции авторобота относительно вертикальной оси Oz ; c_v , c_{Π} — коэффициенты вязкого трения; L_1 и L_2 — расстояния между центром тяжести и передней и задней осью соответственно; e — ширина колеи.

Боковые силы S_{ij} являются результатом сложных динамических процессов, для математического описания которых используются достаточно равноценные модели, созданные на основе различных физических и эмпирических концепций [5, 14–17] и другие. В данной работе используется модель, предложенная в работе [16]. В соответствии с этой моделью боковые силы описываются выражениями

$$S_{ij} = -C_{ai} \operatorname{tg}(\gamma_{ij}) f(\lambda_{ij}), \quad (5)$$

где

$$\gamma_{ij} = \delta - \operatorname{arctg} \left(\frac{V_{\Pi} \beta + (-1)^{i-1} L_1 \dot{\psi}}{V_{\Pi} + (-1)^j e \dot{\psi} / 2} \right); \quad (6)$$

$$f(\lambda_{ij}) = \begin{cases} (2 - \lambda_{ij}) \lambda_{ij}, & \text{если } \lambda_{ij} < 1, \\ 1, & \text{если } \lambda_{ij} \geq 1; \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{\mu_{\max} \tilde{N}_{ij}}{2 C_{ai} \operatorname{tg}(\gamma_{ij})}.$$

В выражениях (5)–(7) C_{ai} — боковая жесткость шин; γ_{ij} — угол скольжения; μ_{\max} — максимальный коэффициент сцепления шин с дорогой; \tilde{N}_{ij} — нормальная нагрузка на шину, $i, j = 1, 2$.

Дискретно-непрерывная модель авторобота

Нелинейности в правых частях уравнений (1)–(7) являются довольно сложными, что существенно затрудняет применение аналитического метода построения квазилинейной модели авторобота, поэтому она была найдена численным методом, предложенным в работе [12]. Этот метод приводит к дискретно-непрерывной квазилинейной модели, которая в случае уравнений (1)–(7) имеет следующий вид:

$$\dot{x} = A(x_k) x + b_{1,k} u_{1,k} + b_{2,k} u_{2,k} + b_{3,k} f_{3,k}; \quad (8)$$

$$kT \leq t < (k+1)T; \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\dot{X} = x_1 \cos(x_2 + x_4); \quad \dot{Y} = x_1 \sin(x_2 + x_4), \quad (9)$$

где $x = x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t)]^T$ — вектор переменных состояния, причем $x_1 = V_{\Pi}$, $x_2 = \psi$, $x_3 = \dot{\psi}$, $x_4 = \beta$; $x_k = x(kT)$, $u_{1,k} = u_1(kT) = F_{1,k} + F_{2,k}$ и $u_{2,k} = u_2(kT) = \delta(kT)$ — дискретные значения вектора состояния, управлений продольной скоростью и направлением движения (поворотами) авторобота, соответственно; T — период дискретизации.

Матрицы и векторы в системе (8) определяются выражениями

$$A(x_k) = \begin{bmatrix} a_{11,k} & 0 & 0 & a_{14,k} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33,k} & 0 \\ a_{41,k} & 0 & -1 & a_{44,k} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$b_{1,k} = \begin{bmatrix} b_{11,k} \\ 0 \\ 0 \\ b_{41,k} \end{bmatrix}; \quad b_{2,k} = \begin{bmatrix} b_{12,k} \\ 0 \\ b_{32,k} \\ b_{42,k} \end{bmatrix}; \quad b_{3,k} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В выражениях (10) коэффициенты $a_{ij,k}$, $b_{ij,k}$, $f_{3,k}$, являются функциональными (их аргументы опущены для краткости). Они были определены указанным выше численным методом, что привело к следующим выражениям:

$$a_{11,k} = -c_v x_{1,k}; \quad a_{33,k} = -c_{\Pi} x_{3,k}; \quad (11)$$

$$a_{14,k} = \begin{cases} a_{14,k-1}, & \text{если } x_{14,k} = 0, \text{ иначе} \\ \frac{m^{-1}}{x_{4,k}} \sum_{i=0}^{N-1} S_k [\sin(\gamma_{1,i} x_{4,k}) - \sin(\gamma_{2,i} x_{4,k})]; \end{cases} \quad (12)$$

$$a_{41,k} = \begin{cases} a_{41,k-1}, & \text{если } x_{1,k} = 0, \text{ иначе} \\ S_k / m x_{1,k}^2; \end{cases} \quad (13)$$

$$a_{44,k} = \begin{cases} a_{44,k-1}, & \text{если } x_{1,k} = 0 \\ \text{или } x_{4,k} = 0, \text{ иначе} \\ \frac{m^{-1}}{x_{4,k} x_{1,k}} \sum_{i=0}^{N-1} S_k [\cos(\gamma_{1,i} x_{4,k}) - \cos(\gamma_{2,i} x_{4,k})]; \end{cases} \quad (14)$$

$$b_{11,k} = 2 m^{-1} \cos(x_{4,k}); \quad (15)$$

$$b_{12,k} = \begin{cases} b_{12,k-1}, & \text{если } u_{2,k} = 0, \text{ иначе} \\ \frac{m^{-1}}{u_{2,k}} \sum_{i=0}^{N-1} [u_{1,k} [\cos(x_{4,k} - \gamma_{1,i} u_{2,k}) - \cos(x_{4,k} - \gamma_{2,i} u_{2,k})] + S_{1,k} [\sin(x_{4,k} - \gamma_{1,i} u_{2,k}) - \sin(x_{4,k} - \gamma_{2,i} u_{2,k})]]; \end{cases} \quad (16)$$

$$b_{32,k} = \begin{cases} b_{32,k-1}, & \text{если } u_{2,k} = 0, \text{ иначе} \\ \frac{1}{u_{2,k} I_z} \sum_{i=0}^{N-1} [L_1 S_{1,k} [\cos(\gamma_{1,i} u_{2,k}) - \\ - \cos(\gamma_{2,i} u_{2,k})] + (L_1 u_{1,k} + e \tilde{S}_k / 2) \times \\ \times [\sin(\gamma_{1,i} u_{2,k}) - \sin(\gamma_{2,i} u_{2,k})]]; \end{cases} \quad (17)$$

$$f_{3,k} = -L_2 S_{2,k} / I_z; \quad (18)$$

$$b_{41,k} = \begin{cases} b_{41,k-1}, & \text{если } x_{1,k} = 0, \text{ иначе} \\ -(\sin x_{4,k}) / m x_{1,k}; \end{cases} \quad (19)$$

$$b_{42,k} = \begin{cases} b_{42,k-1}, & \text{если } x_{1,k} = 0, \text{ или } u_{2,k} = 0, \\ \text{иначе} \\ \frac{m^{-1}}{u_{2,k} x_{1,k}} \sum_{i=0}^{N-1} [u_{1,k} [-\sin(x_{4,k} - \gamma_{1,i} u_{2,k}) + \\ + \sin(x_{4,k} - \gamma_{2,i} u_{2,k})] + \\ + S_{1,k} [\cos(x_{4,k} - \gamma_{1,i} u_{2,k}) - \\ - \cos(x_{4,k} - \gamma_{2,i} u_{2,k})]]; \end{cases} \quad (20)$$

Здесь введены обозначения: $S_k = S_{1,k} + S_{2,k}$, $S_{1,k} = S_{11,k} + S_{12,k}$, $S_{2,k} = S_{21,k} + S_{22,k}$, $\tilde{S}_k = S_{11,k} - S_{12,k}$; $\gamma_1 = (i + 1,5)/N$, $\gamma_2 = (i + 0,5)/N$; N — параметр численного метода синтеза квазилинейных моделей [12]. Дискретные значения боковых сил $S_{ij,k}$ определяются по формулам (5)—(7) с учетом приведенных выше обозначений только в моменты времени kT , $k = 0, 1, 2, \dots$

Поставим задачу синтеза автономной дискретно-непрерывной системы управления автороботом, обеспечивающей устойчивое движение по заданной траектории, включающей прямолинейные участки и повороты, с заданной конечной скоростью.

Решение задачи

Как видно из уравнений (1) и (8), на скорость продольного движения робота V_{Π} влияют оба управления — как u_1 , так и u_2 . Для исключения этого явления управление $u_{1,k}$ принимается [18, 19] в виде

$$u_{1,k} = \begin{cases} u_{1,k-1}, & \text{если } b_{11,k} = 0, \text{ иначе} \\ [\zeta(\varepsilon_{V,k}) - b_{12,k} u_{2,k} - a_{14,k} x_{4,k}] / b_{11,k}, \end{cases} \quad (21)$$

где $\zeta(\varepsilon_{V,k})$ — функция управления продольной скоростью; $\varepsilon_{V,k} = V_{\Pi,k}^* - x_{1,k}$; $V_{\Pi,k}^*$ — заданное

значение скорости продольного движения авторобота, $k = 0, 1, 2, \dots$. Функция $\zeta(\varepsilon_{V,k})$ в данном случае выбирается простейшего вида:

$$\zeta(\varepsilon_{V,k}) = \varsigma_1 \varepsilon_{V,k} + \varsigma_2 q_k + c_v x_{1,k}^2; \quad q_k = q_{k-1} + \varepsilon_{V,k}, \quad (22)$$

где ς_1, ς_2 — параметры закона управления (21), (22); $q_{-1} = 0$.

Синтез подсистемы управления направлением движения авторобота осуществляется известным методом желаемой динамики. В данном случае дифференциальное уравнение, описывающее отклонение угла поворота $\psi(t)$ робота от заданного закона изменения $\psi^* = \psi^*(t)$, принято второго порядка:

$$\ddot{\varepsilon}_{\psi} + \varsigma_3 \dot{\varepsilon}_{\psi} + \varsigma_4 \varepsilon_{\psi} = 0,$$

где $\varepsilon_{\psi} = \psi^* - x_2$ — отклонение угла поворота [19]. При этом первая и вторая производные угла $\psi^*(t)$ заменены их приближенными значениями, которые вычисляются по формулам Эйлера. Отсюда с учетом системы (8) и выражений (11), (17), (18) вытекает дискретный закон управления поворотами авторобота:

$$u_{2,k} = \begin{cases} u_{2,k-1}, & \text{если } b_{32,k} = 0, \text{ иначе} \\ [\varsigma_5 \psi_k^* + \varsigma_6 \psi_{k-1}^* + \varsigma_7 \psi_{k-2}^* - \\ - (\varsigma_3 + a_{33,k}) x_{3,k} + \varsigma_4 x_{2,k}] / b_{32,k}; \end{cases} \quad (23)$$

где $\varsigma_5 = (1 + \varsigma_3 T + \varsigma_4 T^2) \varsigma_7$; $\varsigma_6 = (2 + \varsigma_3 T) \varsigma_7$; $\varsigma_7 = 1/T^2$; $k = 0, 1, 2, \dots$; коэффициенты ς_3, ς_4 выбираются исходя из желаемого характера и длительности переходного процесса по углу поворота $\psi = \psi(t)$.

Найденные выражения (1)—(20) дают модель движений авторобота, а (21)—(23) — дискретные законы управления им.

Исследование системы управления

Для исследования системы управления проведено имитационное моделирование в MATLAB движений мобильного авторобота по заданным траекториям при следующих значениях параметров: $m = 360$ кг, $I_z = 2800$ кг·м²; $L_1 = L_2 = 1,5$ м; $e = 1,5$ м; $C_{ai} = 0,5$ кг·с/см²; $N_{ij} = 900$ Н; $\mu_{\max} = 0,0002$; $c_v = 0,07$ кг/м; $c_{\Pi} = 0,01$ Н·м; $\varsigma_1 = 4,5$ с⁻¹; $\varsigma_2 = 0,07$ с⁻¹; $\varsigma_3 = 5$ с⁻¹; $\varsigma_4 = 6$ с⁻², $N = 200$ и $T = 0,1$ с. При этом предполагалось, что авторобот снабжен измерите-

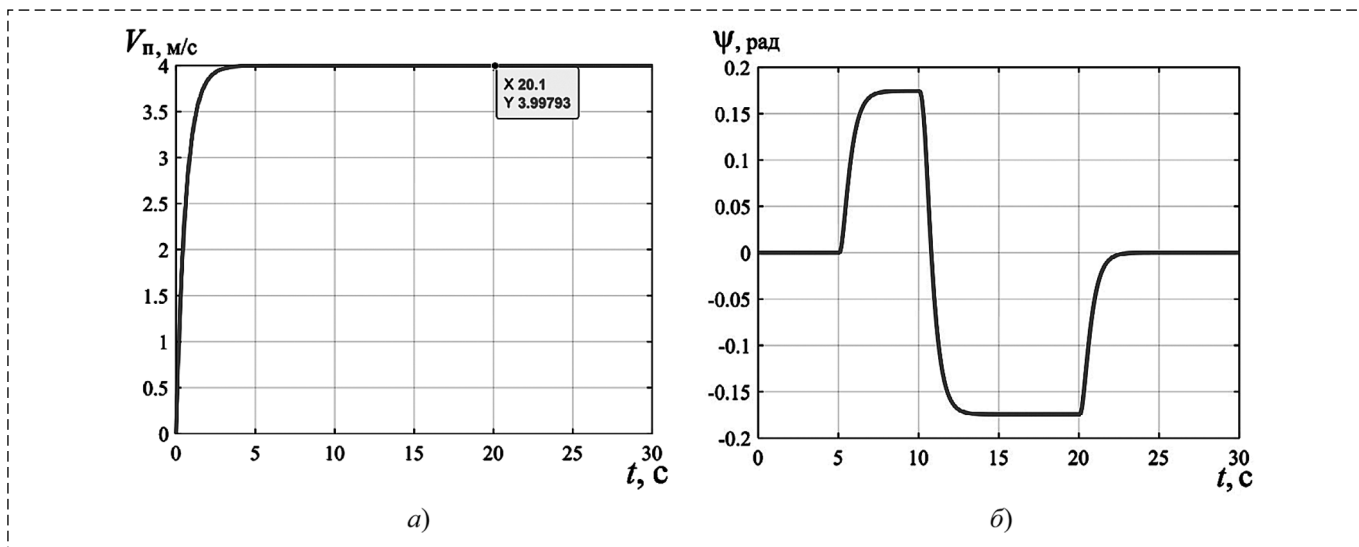


Рис. 2. Движение авторобота с поворотами:

a — график изменения продольной скорости; b — график изменения углов поворотов

Fig. 2. Movement of the robot with turns:

a — graph of the longitudinal velocity changes; b — graph of the angles of turns changes

лями продольной скорости и углов поворота, с пренебрежимо малыми ошибками и запаздыванием. Например, это может быть инерциальная система навигации, результаты которой периодически корректируются с применением системы ГЛОНАСС.

Результаты компьютерного исследования синтезированной системы представлены на рис. 2—6. Отработка автороботом заданных продольной скорости и углов поворота представлена на рис. 2, a , b и рис. 3. Предполагается, что при $t = 0$ ось Ox неподвижного авторобота параллельна оси $O_n X$, а координаты X и Y равны нулю. Стартуя при $t = 0$, авторобот должен набрать скорость 4 м/с и двигаться пря-

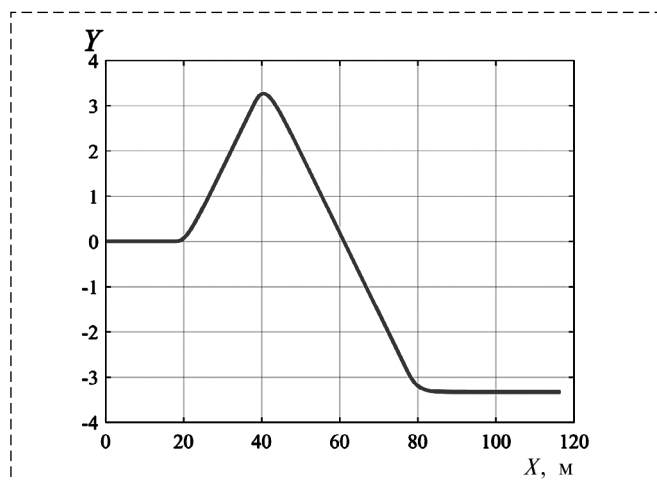


Рис. 3. Результирующая траектория движения

Fig. 3. The resulting trajectory of movement

молинейно ($\psi = 0^\circ$) с этой скоростью до пятой секунды. При $t = 5$ с авторобот должен начать поворот влево на угол 10° , а через 5 с — начать поворот вправо на 20° и двигаться под углом -10° к оси $O_n X$ до 20-й секунды. В этот момент он должен повернуть влево на 10° и двигаться параллельно оси $O_n X$ до 30-й секунды.

Как видно из графиков на рис. 2, a и 2, b , продольная скорость авторобота V_n и углы поворота в установившемся режиме соответствуют заданным значениям.

На рис. 3 приведена результирующая траектория движения авторобота по горизонтальной поверхности, соответствующая маневрам, выполненным автороботом. Отметим, что перемещение авторобота вдоль оси $O_n X$ составило ≈ 120 м за 30 с, что соответствует заданной скорости.

Траектории движения авторобота в общем случае могут задаваться программой изменения углов поворота, являющейся функцией времени, как показано выше, а также в виде функции координат X, Y , т. е. как функции перемещения авторобота вдоль осей $O_n X$ и $O_n Y$. В качестве примера приведем описание программы движения авторобота по более сложной траектории. Авторобот стартует также при $t = 0$ из того же положения, что и выше, но здесь он должен двигаться со скоростью 5 м/с в течении 78 с.

Заданная траектория: сначала авторобот должен двигаться под углом 45° к оси $O_n X$ до

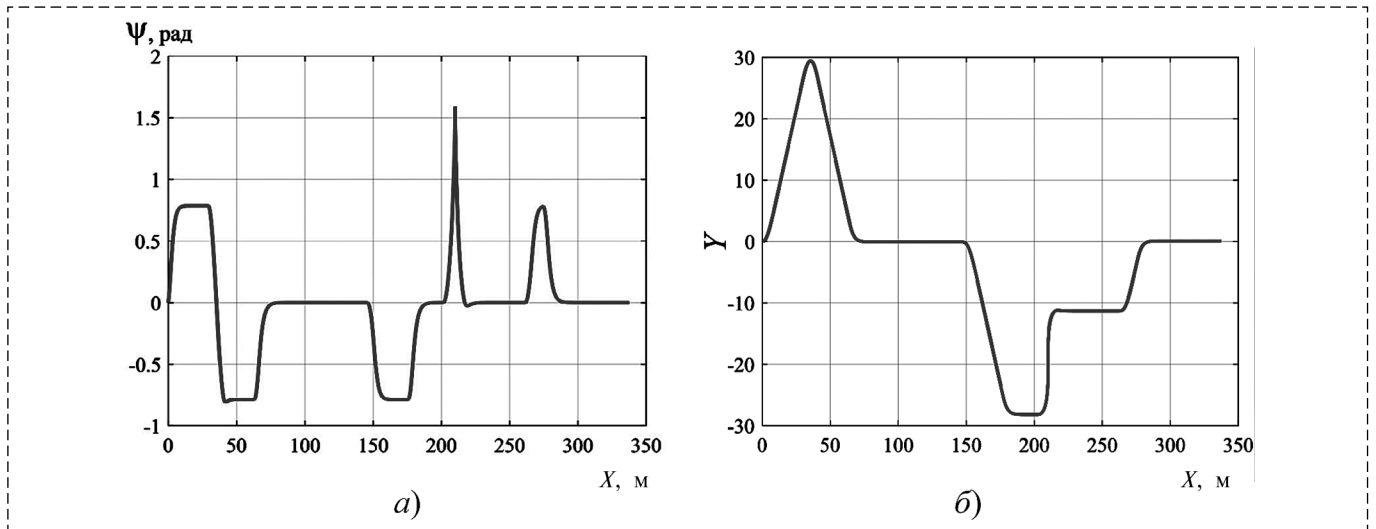


Рис. 4. Результаты моделирования:

a — график изменения углов поворота; *b* — результирующая траектория

Fig. 4. Simulation results:

a — graph of the turns angles change; *b* — the resulting trajectory

$X = 25$ м. В этой точке он должен начать поворот вправо на 90° и далее двигаться под углом -45° до $X = 65$ м. Здесь авторобот должен начать поворот влево на 45° и, достигнув угла 0° к оси $O_H X$, двигаться в этом направлении до $X = 145$ м. Здесь необходимо повернуть вправо на угол 45° и двигаться под углом -45° до $X = 175$ м. Затем авторобот должен повернуть влево на угол 45° и, достигнув угла 0° к оси $O_H X$, двигаться в этом направлении до $X = 200$ м. Здесь авторобот должен повернуть влево на 90° и двигаться в этом направлении до $X = 210$ м; в этой точке робот должен повернуть вправо на угол 90° и двигаться в этом направлении (перпендикулярно оси $O_H X$) до достижения координаты $Y = -11$ м. В этой точке авторобот должен

повернуть вправо на 90° и двигаться в направлении, параллельном оси $O_H X$, до $X = 265$ м. Здесь авторобот должен повернуть влево на 45° влево и двигаться до $X = 275$ м, где повернуть вправо на 45° и двигаться в этом направлении до конца маршрута.

Изменения углов поворота авторобота в функции координаты X и траектория движения авторобота, полученные путем имитационного моделирования, приведены на рис. 4. Эти графики свидетельствуют, что авторобот достаточно точно следует заданной программе движения.

Для более полного представления особенностей описанного процесса движения авторобота на рис. 5 приведен график изменения

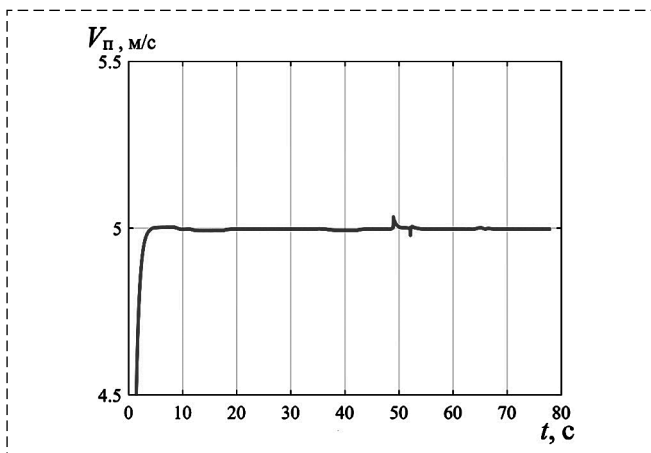


Рис. 5. Продольная скорость

Fig. 5. Longitudinal velocity

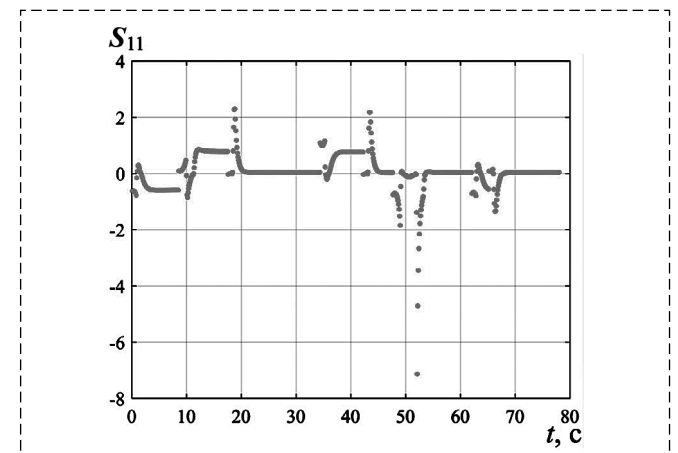


Рис. 6. Боковые силы

Fig. 6. Transverse forces

продольной скорости авторобота, а на рис. 6 показаны боковые силы, действующие на переднее левое колесо. Аналогичный характер имеют и силы, приложенные к другим колесам авторобота.

Как видно, боковые силы возникают только при поворотах авторобота, когда его кузов из-за инерции отклоняется в сторону, вызывая деформацию шин. Отметим, что при изменении направления поворота авторобота знаки боковых сил изменяются на противоположные, что соответствует реальной ситуации. При этом продольная скорость движения поддерживается системой управления достаточно точно, хотя при поворотах она изменяется в небольших интервалах.

Заданная траектория имеет множество поворотов на разные углы, однако синтезированная система управления обеспечивает движение авторобота в безэкипажном режиме по ней достаточно точно.

Заключение

На основании результатов моделирования движений авторобота, приведенных выше, можно заключить, что дискретно-непрерывная квазилинейная модель нелинейного авторобота, полученная численным методом, достаточно точно описывает его движения. Синтезированная на основе этой квазилинейной модели дискретная система управления автономного авторобота обеспечивает его движение по сложной заданной траектории с заданной скоростью. При этом предполагается, что авторобот оснащен системой измерения скорости, углов поворота и координат текущего положения авторобота. В этом случае необходимая траектория движения может быть предварительно задана либо как функция времени, либо как функция координат его текущего положения. Для движения по дорогам, без предварительного задания траектории, автономный авторобот может быть оборудован системой слежения за дорогой.

Список литературы

1. Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A., Trubin V. G., Roth H. Parametric Synthesis of the Control System of the Balancing Robot by the Numerical Optimization Method // *Mekhatronica, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2019. Vol. 20, N. 6. P. 532–361. DOI: [org/10.17587/mau.20.352-361](https://doi.org/10.17587/mau.20.352-361).

2. Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю. Синтез системы управления мобильным роботом методом интеллектуальной эволюции // *Надежность и качество сложных систем*. 2013. № 3. С. 52–59.
3. Benaoumeur I., Laredj B., Kamel B., Reda H. E., Zoubir A. F. Backstepping controller with force estimator applied for mobile robot // *Przeglad Elektrotechniczny, Wydawnictwo Czasopism i Ksiazek Technicznych Sigma*. 2019. Vol. 10. P. 18–21. DOI: [10.15199/48.2019.10.03](https://doi.org/10.15199/48.2019.10.03)
4. Cruz C. D. L., Carelli R. O. Dynamic modeling and centralized formation control of mobile robots // *IECON 2006 — 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. P. 3880–3885. DOI: [10.1109/IECON.2006.347299](https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347299)
5. Pacejka H. B. *Tyre and Vehicle Dynamics*. Amsterdam: Elsevier, 2006. 642 p.
6. Воевода А. А., Филюшов В. Ю. Линеаризация обратной связью: перевернутый маятник // *Сборник научных трудов НГТУ*. 2016. № 3(85). С. 49–60.
7. Isidori A. Robust Feedback Design for Nonlinear Systems: a Survey // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2010. Vol. 18. P. 693–714.
8. Лукьянов А. Г., Уткин В. И. Метод преобразования уравнений динамических систем к регулярной форме // *Автоматика и телемеханика*. 1981. № 4. С. 5–13.
9. Xia M., Rahnama A., Wang S., Antsaklis P. J. Control Design Using Passivation for Stability and Performance // *IEEE Transactions on control*. 2018. Vol. 63, No. 9. P. 2987–2993.
10. Pshikhopov V., Medvedev M. Position Control of Vehicles with Multi-Contour Adaptation // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. P. 8921–8928.
11. Gaiduk A. R. Design of nonlinear systems based on the controllable Jordan form // *Automation and Remote Control*. 2006. Vol. 67, No. 7. P. 1017–1027.
12. Гайдук А. Р. Численный метод синтеза квазилинейных моделей нелинейных объектов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021. Т. 22, № 6. С. 283–290.
13. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. О проблеме согласной параллельной коррекции систем регулирования // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2015. Том 16, № 8. С. 507–514. DOI: [org/10.17587/mau.16.507-514](https://doi.org/10.17587/mau.16.507-514).
14. Жуков К. Г. Алгоритм реализации параллельных вычислений по формулам Рунге-Кутты // *Информатика, телекоммуникации, управление*. 2021. Вып. 6(138). Часть 2. С. 143–149.
15. Dugoff H., Fancher P., Segel L. An Analysis of Tire Traction Properties and Thire Influence on Vehicle Dynamic Performance // *SAE paper 700377*. February 01, 1970.
16. Cunha F. H. R., Victorino A. C., Ghandour R., Charara A. Vehicle Dynamics Prediction Based on State Observers Entries Anticipation // *Preprints on the 18th IFAC World Congress, Milano, August 28 — September 2. 2011*. P. 2260–2265.
17. Можаровский В. В., Кузьменков Д. С., Василевич Ю. В., Киргинцева С. В. Методика и алгоритм расчета параметров контакта при взаимодействии шины колеса с основанием // *Математические методы в технологиях и технике*. 2022. № 11. С. 43–47. DOI [10.52348/2712-8873_MMTT_2022_11_43](https://doi.org/10.52348/2712-8873_MMTT_2022_11_43).
18. Кабала А. Е. А., Гайдук А. Р. Преобразование модели автономного робота // *Математические методы в технологиях и технике*. 2021. № 7. С. 27–30.
19. Лукин Д. С., Гайдук А. Р. Дискретное управление движением автономного робота автомобильного типа // *Математические методы в технологиях и технике*. 2022. № 1. С. 17–20. DOI [10.52348/2712-8873_MMTT_2022_1_17](https://doi.org/10.52348/2712-8873_MMTT_2022_1_17).

Design of Nonlinear Control Systems for Autorobots

A. R. Gaiduk, gaiduk_2003@mail.ru, D. S. Lukin, dlukin@sfnu.ru,
Southern Federal University, Taganrog, 347922, Russian Federation

Corresponding author: Gaiduk A. R., Dr. of Sc., Professor, Southern Federal University,
Taganrog, 347922, Russian Federation, e-mail: gaiduk_2003@mail.ru

Accepted on November 09, 2022

Abstract

Currently, various types of robots are increasingly being used to solve different tasks. Most often, these are mobile robots that move on the earth's surface performing the assigned tasks, in particular, they are four-wheeled robots similar to a car — autorobots. As control objects, the robots are essentially nonlinear, which requires the use of nonlinear methods for the control system design. At the same time, it is difficult to apply traditional methods for designing nonlinear control systems due to a complex type of nonlinearities in the equations of mobile robots and, in particular, autorobots. In this paper, the design problem is solved using a discrete-continuous quasilinear model, which is created on the basis of the nonlinear differential equations in the Cauchy form. Due to the great complexity of the nonlinearities of the autorobot equations, the corresponding quasilinear model is created by the numerical method. The quasilinear model obtained by this method is discrete-continuous and controllable, moreover, its state variables are measurable. The discrete autorobot control system includes two practically independent control subsystems: longitudinal speed and turns. A discrete PI control law is used to control the speed, and the discrete turn control subsystem is designed by the method of desired dynamics. The resulting autorobot control system provides a stable movement along the trajectory, which can be set as a function of time or as a function of the coordinates of the moving autorobot's position.

The suggested approach can be used to design control systems for nonlinear objects of various purposes with complex differentiated nonlinearities. However, the design problem has a solution if the corresponding discrete-continuous quasilinear model of the object is controllable, and the state variables are measurable.

Keywords: controlled object, nonlinearity, discrete-continuous quasilinear model, longitudinal motion, turn, control law, control system

For citation:

Gaiduk A. R., Lukin D. S. Design of Nonlinear Control Systems for Autorobots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 85–92.

DOI: 10.17587/mau.24.85-92

References

1. Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A., Trubin V. G., Roth H. Parametric synthesis of the control system of the balancing robot by the numerical optimization method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 532–361, DOI: org/10.17587/mau.20.352-361
2. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu. Synthesis of a Mobile Robot Control System by Method of Intellectual Evolution, *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2013, no. 3, pp. 52–59 (In Russian).
3. Benaoumeur I., Laredj B., Kamel B., Reda H. E., Zoubir A. F. Backstepping Controller with Force Estimator Applied for Mobile Robot, *Przegląd Elektrotechniczny, Wydawnictwo Czasopism i Książek Technicznych Sigma*, 2019, vol. 10, pp. 18–21, DOI: 10.15199/48.2019.10.03
4. Cruz C. D. L., Carelli R. O. Dynamic modeling and centralized formation control of mobile robots, *IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 3880–3885, doi: 10.1109/IECON.2006.347299.
5. Pacejka H. B. Tyre and Vehicle Dynamics, Amsterdam, Elsevier, 2006, 642 p.
6. Voevoda A. A., Filiushov V. Yu. Linearization by feedback: Inverted Pendulum, *Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, 2016, no. 3(85), pp. 49–60 (In Russian).
7. Isidori A. Robust Feedback Design for Nonlinear Systems: a Survey, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2010, vol. 18, pp. 693–714.
8. Lukyanov A. G., Utkin V. I. Methods of transform of dynamic systems equations to regular form, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1981, no. 4, pp. 5–13 (In Russian).
9. Xia M., Rahnama A., Wang S., Antsaklis P. J. Control Design Using Passivation for Stability and Performance, *IEEE Transactions on control*, 2018, vol. 63, no. 9, pp. 2987–2993.
10. Pshikhopov V., Medvedev M. Position Control of Vehicles with Multi-Contour Adaptation, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, pp. 8921–8928.
11. Gaiduk A. R. Design of nonlinear systems based on the controllable Jordan form, *Automation and Remote Control*, 2006, vol. 67, no. 7, pp. 1017–1027.
12. Gaiduk A. R. Numerical Design Method of Quasilinear Models for Nonlinear Objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 6, pp. 283–290 (In Russian).
13. Filimonov A. B., Filimonov N. B. On the problem of consonant parallel correction of regulatory systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 507–514 (In Russian), DOI.org/10.17587/mau.16.507-514
14. Zhukov K. G. Algorithm for implementing parallel computations using Runge-Kutta formulas, *Computer science, telecommunications, management*, 2021, iss. 6(138), part 2, pp. 143–149 (In Russian).
15. Dugoff H., Fancher P., Segel L. An Analysis of Tire Traction Properties and Thire Influence on Vehicle Dynamic Performance, *SAE paper 700377*, February 01, 1970.
16. Cunha F. H. R., Victorino A. C., Ghandour R., Charara A. Vehicle Dynamics Prediction Based on State Observers Entries Anticipation, *Preprints on the 18th IFAC World Congress, Milano, August 28 – September 2, 2011*, pp. 2260–2265.
17. Mozharovsky V. V., Kuzmenkov D. S., Vasilevich Yu. V., Kirgintseva S. V. Methodology and algorithm for calculating contact parameters during the interaction of the wheel tire with the base, *Mathematical methods in technologies and engineering*, 2022, no. 11, pp. 43–47 (In Russian), doi 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_11_43
18. Kabalan A. E. A., Gaiduk A. R. Transformation of an autonomous robot model, *Mathematical methods in technology and engineering*, 2021, no. 7, pp. 27–30 (In Russian).
19. Lukin D. S., Gaiduk A. R. Discrete motion control of an autonomous robot of automobile type, *Mathematical methods in technologies and engineering*, 2022, no. 1, pp. 17–20 (In Russian), DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_1_17

С. А. Кабанов, д-р техн. наук, проф., kaba-sa@mail.ru,
 Д. С. Кабанов, канд. техн. наук, науч. сотр., kabanovds@mail.ru,
 Ф. В. Митин, канд. техн. наук, доц., fedor28@list.ru,

Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Оптимизация курсового движения беспилотного автомобиля при наличии препятствий и возмущений*

Рассматривается оптимизация процесса управления беспилотным автомобилем. В настоящее время идет активная разработка и использование беспилотного транспорта. Существует практика применения беспилотных шаттлов на закрытых площадках (конференциях, форумах и пр.). Тестируется применение автомобилей с автоматизированным управлением в городских условиях и на пересеченной местности. В связи с этим важной является разработка алгоритмов управления, позволяющих решать задачи контроля автомобиля в режиме реального времени при действии возмущений и наличии препятствий. С развитием технологий и увеличением вычислительных мощностей появляется возможность использовать алгоритмы оптимального управления, которые позволяют добиться лучших результатов при выполнении терминальных условий, минимизации энергетических затрат. В данной работе показано решение задачи оптимального управления беспилотным автомобилем при наличии штрафной функции, шумов измерений и возмущений по неполным данным с использованием принципа разделения. Решена задача оптимального управления в детерминированной и стохастической постановках с использованием алгоритма с прогнозирующей моделью с функционалом обобщенной работы. Показана эффективность применения фильтра Калмана в зависимости от разной интенсивности шумов измерений и различной скорости движения автомобиля. Приведены результаты численного моделирования, показывающие возможность использования предложенного алгоритма для осуществления управления беспилотным автомобилем при различных начальных и конечных условиях. Разработанный алгоритм успешно применен для объезда движущегося объекта.

Ключевые слова: математическая модель, беспилотный автомобиль, управление, оптимизация

Введение

В настоящее время активно идет процесс информатизации и внедрения цифровой инфраструктуры во все сферы жизни общества. Одним из направлений информатизации является автоматизация и роботизация. Развитие микропроцессорной техники делает данные направления быстроразвивающимися. Эти процессы также влияют и на внедрение беспилотных подвижных аппаратов, в частности беспилотных автомобилей [1–3].

Беспилотный автомобиль (Unmanned Ground Vehicle — беспилотный наземный аппарат) — транспортное средство, передвигающееся по земле без участия человека или с неполным его участием, оборудованное автоматической системой управления.

Управление беспилотным автомобилем осуществляется посредством датчиков и программного обеспечения, которое обеспечивает работу всех систем автомобиля: рулевого управ-

ления, коробки передач, тормозной системы и др. Датчики получают информацию об окружающей обстановке и передают эту информацию для управления. Наиболее распространенными датчиками являются лидары — дальнометры оптического распознавания, радары, системы глобального позиционирования, датчики одометрии и гиростабилизаторы [4–7].

Основные принципы работы беспилотных автомобилей построены на решении следующих задач:

- перемещение автомобиля из одного заданного пункта в другой самым оптимальным путем с учетом данных карты;

- распознавание препятствий, знаков, светофоров, четкое построение пути при разных погодных условиях;

- самостоятельная регуляция скорости на опасных участках и поворотах, а также при объезде препятствий.

Беспилотные автомобили применяются в различных областях: в сельском хозяйстве, для помощи людям с особыми потребностями, в перевозке грузов в опасных зонах или на большие расстояния. Изучают и разрабатывают беспилотные автомобили для доставки грузов множество компаний как в РФ, так и за рубежом [8, 9].

Для решения задачи управления интересно рассмотреть алгоритмы оптимального управления, которые позволят самостоятельно про-

*Работа выполнена в организации ФГБОУ ВО БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (доп. соглашение от 09.06.2020 № 075-03-2020-045/2 на выполнение базовой части государственного задания "Разработка фундаментальных основ создания и управления группировками высокоскоростных беспилотных аппаратов космического и воздушного базирования и группами робототехнических комплексов наземного базирования")

кладывать маршрут до заданной точки при наличии подвижных препятствий, возмущений и шумов измерений [11].

Математическая модель

Рассматривается задача оптимального управления траекторией движения автомобиля в горизонтальной плоскости. В работе [10] на основе уравнения Лагранжа II-го рода получена система дифференциальных уравнений, описывающая динамику курсового движения автомобиля. В работе [12] для исследований курсового движения эти уравнения сведены к системе обыкновенных дифференциальных уравнений пятого порядка.

При составлении данных уравнений приняты следующие допущения:

1. Кузов автомобиля — твердое тело, имеющее продольную плоскость симметрии, т. е. не учитывается деформация рамы на кручение и изгиб.

2. Центр тяжести кузова все время находится в продольной плоскости и движется так, что проекция его скорости на горизонтальную плоскость дороги остается постоянной.

3. Отсутствует влияние продольных и поперечных реакций дороги на колебания масс автомобиля.

4. Оси мостов движутся в плоскостях, перпендикулярных к плоскости рамы; траектории движения центров масс — прямые, нормальные к плоскости рамы.

5. Моменты инерции мостов относительно осей вращения колес равны нулю.

6. Неуравновешенность и гироскопические моменты вращающихся масс трансмиссии и двигателя равны нулю.

7. Колебания масс автомобиля малы.

8. Контакт шин с дорогой точечный.

Данная схема применима для расчета движения автомобиля в определенном коридоре (дороге), внутри которого должен находиться автомобиль. Поэтому при построении сложного маршрута необходимо разбивать его на участки с более простыми маневрами. Расчетная схема, приведенная ниже, является классическим объектом исследования в теории автомобиля. Ее можно применять для качественного изучения простейших случаев курсового движения автомобиля по горизонтальной ровной поверхности без учета поперечного крена кузова при воздействии внешних активных сил. Применение та-

кой схемы допустимо, когда можно пренебречь нелинейностью характеристик подвески и шин. В противном случае потребуется применять для исследования движения автомобиля уравнения, описывающие самый общий случай движения, и соответствующую модель качения колеса.

В данной статье в качестве математической модели использована следующая система дифференциальных уравнений:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{u}, t) + \xi_x,$$

где $\mathbf{X} = (V_z \ \omega_y \ z \ \psi \ x)^T$ — вектор состояния; $\xi_x = [\xi_{x1} \ \xi_{x2} \ \xi_{x3} \ \xi_{x4} \ \xi_{x5}]^T$ — возмущения с интенсивностью $\mathbf{B}_x = \text{diag}(B_{x1} \ B_{x2} \ B_{x3} \ B_{x4} \ B_{x5})$; $\mathbf{u} = (u_\theta \ u_V \ u_t)^T$ — вектор управления; t — время; V_z — боковая составляющая скорости; x и z — продольная и боковая дальности; ω_y — проекция абсолютной угловой скорости на вертикальную ось (угловая скорость рыскания); ψ — угол поворота по курсу (рыскания). В поэлементном виде система представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{V}_z &= -\frac{2(k_{y1} + k_{y2})}{mV} V_z + \\ &+ \left(\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{mV} - V \right) \omega_y + \frac{2k_{y1}}{m} \theta + \xi_{x1}; \\ \dot{\omega}_y &= \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y V} V_z - \\ &- \left(\frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)}{I_y V} \right) \omega_y + \frac{2k_{y1}}{I_y} \theta + \xi_{x2}; \quad (1) \\ \dot{z} &= V_z + V_x \psi + \xi_{x3}; \\ \dot{\psi} &= \omega_y - V_x k_r + \xi_{x4}; \\ \dot{x} &= V_x + \xi_{x5}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} k_r &= \sqrt{\frac{(x'^2 + z'^2)(x''^2 + z''^2) - (x'x'' + z'z'')}{(x'^2 + z'^2)^3}}; \\ \dot{\theta} &= u_\theta; \dot{V}_x = u_V; \dot{t}_f = u_t; \text{sign} k_r = \text{sign} z''; \\ x' &= \frac{x_1 - x_0}{\Delta t}; x'' = \frac{x_2 - 2x_1 + x_0}{\Delta t^2}; \\ z' &= \frac{z_1 - z_0}{\Delta t}; z'' = \frac{z_2 - 2z_1 + z_0}{\Delta t^2}; \\ V &= \sqrt{V_z^2 + V_x^2}; \end{aligned}$$

V_x — продольная составляющая скорости; m — масса автомобиля; a и b — расстояния от центра тяжести до переднего и заднего мостов; k_{y1} и

k_{y2} — коэффициенты сопротивления уводу шин передней и задней осей; k_r — кривизна средней линии траектории; θ — угол поворота передних колес; u_θ — управление углом поворота колес; u_t — управление интервалом оптимизации; u_v — управление скоростью; t_f — момент окончания процесса оптимизации. Приняв автомобиль за прямоугольной параллелепипед, момент инерции определяем как $I_y = 1/12m(a^2 + b^2)$.

Примем, что измерению доступны угловая скорость рыскания ω_z , координаты x и z . Для этого предполагается использовать датчик 4GNSS OC-213 [13]. Для задачи курсового движения автомобиля уравнения наблюдения рассмотрим в виде

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(x, y) + \xi_z, \quad (2)$$

где $\mathbf{z} = [0 \ z_2 \ z_3 \ 0 \ z_5]^T$, $\mathbf{h} = [0 \ \omega_z \ y \ 0 \ x]^T$, $\xi_z = [\xi_{z1} \ \xi_{z2} \ \xi_{z3} \ \xi_{z4} \ \xi_{z5}]^T$ — случайные процессы типа белого шума с интенсивностью $\mathbf{B}_z = \text{diag}(B_{z1}, B_{z2}, B_{z3}, B_{z4}, B_{z5})$.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}} &= \hat{V}_z - V_x \hat{\psi} + R_{32} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{\omega}_y) + \\ &+ R_{33} B_{z3}^{-1} (z_3 - \hat{z}) + R_{35} B_{z5}^{-1} (z_5 - \hat{x}); \\ \dot{\hat{\psi}} &= \hat{\omega}_y - V_x k_r + R_{42} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{\omega}_y) + \\ &+ R_{43} B_{z3}^{-1} (z_3 - \hat{z}) + R_{45} B_{z5}^{-1} (z_5 - \hat{x}); \\ \dot{\hat{x}} &= V_x + R_{52} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{\omega}_y) + \\ &+ R_{53} B_{z3}^{-1} (z_3 - \hat{z}) + R_{55} B_{z5}^{-1} (z_5 - \hat{x}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{R}} &= \mathbf{f}_x \mathbf{R} + \mathbf{R} \mathbf{f}_x^T - \mathbf{R} \mathbf{h}_x^T \mathbf{B}_z^{-1} \mathbf{h}_x \mathbf{R} + \mathbf{B}_x, \\ \mathbf{R}(t_0) &= \mathbf{R}_0. \end{aligned}$$

Здесь

$$\mathbf{f}_x = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x}; \quad \mathbf{h}_x = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial x}; \quad \mathbf{h}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{f}_x = \begin{bmatrix} \frac{2V_z^2(k_{y1} + k_{y2})}{m(V_x^2 + V_z^2)^{3/2}} - \frac{2(k_{y1} + k_{y2})}{m(V_x^2 + V_z^2)^{1/2}} - \omega_y \left(\frac{V_z}{(V_x^2 + V_z^2)^{1/2}} - \frac{2V_z(k_{y2}b - k_{y1}a)}{m(V_x^2 + V_z^2)^{3/2}} \right) & -(V_x^2 + V_z^2)^{1/2} - \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{m(V_x^2 + V_z^2)^{1/2}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y(V_x^2 + V_z^2)^{1/2}} - \frac{2V_z^2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y(V_x^2 + V_z^2)^{3/2}} + \frac{2V_z\omega_y(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y(V_x^2 + V_z^2)^{3/2}} & -\frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)}{I_y(V_x^2 + V_z^2)^{1/2}} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & V_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

Задача управления

В соответствии с принципом разделения задаче управления предшествует задача оценивания вектора состояния по неполным данным, заданным уравнением (1). Оптимальную оценку можно получить с помощью фильтра Калмана, уравнения которого для данной задачи будут иметь вид

$$\begin{aligned} \dot{\hat{V}}_z &= -\frac{2(k_{y1} + k_{y2})}{mV} \hat{V}_z + \left(\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{mV} - V \right) \hat{\omega}_y + \\ &+ \frac{2k_{y1}}{m} \theta + R_{12} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{\omega}_y) + \\ &+ R_{13} B_{z3}^{-1} (z_3 - \hat{z}) + R_{15} B_{z5}^{-1} (z_5 - \hat{x}); \\ \dot{\hat{\omega}}_y &= \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y V} \hat{V}_z - \left(\frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)}{I_y V} \right) \hat{\omega}_y + \\ &+ \frac{2k_{y1}}{I_y} \theta + R_{22} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{\omega}_y) + \\ &+ R_{23} B_{z3}^{-1} (z_3 - \hat{z}) + R_{25} B_{z5}^{-1} (z_5 - \hat{x}); \end{aligned}$$

$R_{ii}(t_0) = R_0$, $i = \overline{1, n}$, остальные элементы матрицы начальных ковариаций ошибок оценивания принимались равными нулю.

Главная с инженерной точки зрения задача, возникающая при синтезе фильтра, — задать математические модели шумов. Согласно работе [10] шумы системы "автомобиль—водитель" могут быть заданы в виде белого шума со спектральной плотностью мощности, равной единице.

Требуется перевести автомобиль из начального положения $\mathbf{X}(0)$ в конечное $\mathbf{X}(t_f)$ с учетом объезда препятствий при наличии внешних возмущений ξ_x и шумов измерений ξ_z .

Критерий оптимальности выбран в виде функционала А. А. Красовского [14, 15]

$$I = V_f(x, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} Q(x, t) dt + 0,5 \int_{t_0}^{t_f} (\mathbf{u}^T \mathbf{k}^{-2} \mathbf{u} + \mathbf{u}_0^T \mathbf{k}^{-2} \mathbf{u}_0) dt,$$

где $V_f = 0,5\rho_1[x(t_f) - x_f]^2 + 0,5\rho_2[z(t_f) - z_f]^2$; $\rho_1, \rho_2, \mathbf{k} = \text{diag}(k_\theta, k_v, k_d)$ — заданные коэффициенты; \mathbf{u}_0 — оптимальные значения \mathbf{u} ; $Q(x, y)$ —

функция штрафа, ограничивающая маневры автомобиля при наличии препятствий по пути следования:

$$Q(x, t) = \begin{cases} 0, 5\Delta^T \beta \Delta, & |\Delta x| < q_x, |\Delta z| < q_z; \\ 0, & \end{cases}$$

где $\Delta = (\Delta x \ \Delta z)^T$, $\beta = \text{diag}(\beta_1, \beta_2)$, Δx , Δz — запретная область движения автомобиля; β_1 , β_2 — заданные коэффициенты; q_x , q_z — заданные размеры штрафной области.

Общепринятая на практике постановка задачи совмещенного синтеза оптимального управления системами опирается на теорему разделения. Согласно этой теореме оптимальная система управления состоит из оптимального фильтра, формирующего оценки вектора состояния системы, и оптимального регулятора, определяющего управление уже в детерминированной постановке в предположении, что вектор состояния известен точно. Результат этой теоремы, доказанной для линейных систем, вполне обоснованно при малых ошибках оценивания переносится на нелинейные системы [14, 16, 17]. В противном случае и без того сложная и трудоемкая задача резко усложняется. В этом случае можно, например, в силу двойственности задач оптимального управления и оценивания применить подход к совмещенному синтезу управления с рассмотрением функционала обобщенной работы. В данной статье для построения управления применяется линеаризованный фильтр Калмана и алгоритм с прогнозирующей моделью [15].

Гамильтониан задачи имеет вид

$$H = p_V \dot{V}_z + p_\omega \dot{\omega}_y + p_z \dot{z} + p_\psi \dot{\psi} + p_x \dot{x} + p_\theta \dot{\theta} + p_{V_x} \dot{V}_x + p_t \dot{t} + Q + 0, 5 \mathbf{u}^T \mathbf{k}^{-2} \mathbf{u}_0,$$

где уравнения для сопряженных переменных имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{p}_V = & p_V \left[\omega_y \left(\frac{V_z}{V} + \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_z}{mV^3} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{2(k_{y1} + k_{y2})}{mV} - \frac{2(k_{y1} + k_{y2})V_z^2}{mV^3} \right] + \\ & - p_z - p_\omega \left[\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y V} - \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_z^2}{I_y V^3} + \right. \\ & \left. + \frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)V_z \omega_y}{I_y V^3} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{p}_\omega = & p_V \left[V - \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{mV} \right] - \\ & - p_\psi + p_\omega \left[\frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)}{I_y V} \right]; \end{aligned}$$

$$\dot{p}_z = 0;$$

$$\dot{p}_\psi = -p_z V_x;$$

$$\dot{p}_x = 0;$$

$$p_t = H_m(X, p, t_f); H_m = H|_{u=0};$$

$$p_\theta = -p_V \left(\frac{2k_{y1}}{m} \right) - p_\omega \left(\frac{2ak_{y1}}{I_y} \right);$$

$$\begin{aligned} p_{V_x} = & p_V \left[\omega_y \left(\frac{V_x}{V} + \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_x}{mV^3} \right) - \right. \\ & - \left(\frac{2(k_{y1} + k_{y2})V_z V_x}{mV^3} \right) \left. \right] + p_\omega \left[\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_x}{I_y V^3} - \right. \\ & - \left. \frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)\omega_y V_x}{I_y V^3} \right] - p_z \psi + p_\psi k_r - p_x. \end{aligned}$$

Управления формируются согласно уравнениям

$$u_\theta = -k_\theta^2 p_\theta; u_V = -k_V^2 p_V; u_t = -k_t^2 p_t,$$

где u_θ , u_V , u_t — составляющие вектора управления \mathbf{u} ; k_θ , k_V , k_t — заданные коэффициенты.

Результаты расчетов

В качестве автомобиля был выбран УАЗ-3159. Коэффициенты увода колес рассчитываются в соответствии с графиком [18]. В таблице приведены данные для моделирования движения.

Примем, что с помощью БПЛА ведется разведка местности (квадрат 10×10 км); по результатам наблюдений происходит формирование 3D-модели местности; для наземного аппарата ставится цель достигнуть заданной точки в данной местности исходя из возможности проходимости аппарата и минимизации энергетических затрат.

Обозначение, принимаемое в расчетах, ед. изм.	Значение параметра	Описание
m , кг	2000	Масса автомобиля
a , м	0,92	Расстояние от центра масс до передней оси
b , м	1,84	Расстояние от центра масс до задней оси
$k_{y1} = k_{y2}$	3500	Коэффициент сопротивления уводу шин

Вначале решалась задача управления при переводе автомобиля из начального положения $x, z = (0, 0)$ в заданное положение $(x, z) = (10000, 10000)$ при наличии штрафной зоны с центром в точке с координатами $(x, z) = (2000; 3000)$ и радиусом штрафной зоны 1000 м. При значениях $\beta_1 = \beta_2 = 10$, $\rho_1 = \rho_2 = 0,504$; $k_\theta = 0,00025$; $k_V = 0,0016$; $k_t = 0,002$ удалось добиться решения поставленной задачи. При этом за счет управления u_t конечное время моделирования t_f увеличилось с 16 с до 183 с.

Для отработки предлагаемого алгоритма управления требуется решение задачи на более коротком участке траектории. Поскольку в случае достижения точки $(x, z) = (10000, 10000)$ алгоритм активно работает только в зоне функции штрафа, в дальнейшем беспилотный автомобиль движется по прямой при небольшом изменении управления. При построении оптимальной траектории в зависимости от поступающей текущей информации о местоположении автомобиля и появлении препятствий целесообразно формировать управление на относительно небольших прогнозируемых интервалах времени. Если расстояние до штрафной зоны больше ее линейного размера примерно в 2 раза, то данную зону можно не учитывать, так как она не оказывает влияния на полученное управление.

Рассмотрим применение алгоритма последовательной оптимизации при переводе автомобиля из начального положения $(x, z) = (0, 5)$ в заданное положение $(x, z) = (250, 0)$ при наличии штрафной зоны с центром в точке с координатами $(x, z) = (175, 3)$, радиусом штрафной зоны $R_z = 0,2$ м, $R_x = 20$ м (кривая 3, рис. 1) и при ее отсутствии (рис. 1).

При значениях $\rho_1 = 7$; $\rho_2 = 0,02$; $k_\theta = 0,008$; $k_V = 0,003$; $k_t = 0,1$ удалось добиться решения

поставленной задачи при отсутствии штрафной зоны (кривая 1, рис. 1). При этом скорость V_x и время моделирования t_f не изменились и остались равны своим начальным значениям $V_x(0) = 16,7$ м/с и $t_f(0) = 15$ с соответственно.

При значениях $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 100$, $\rho_1 = 1,03$; $\rho_2 = 1,05$; $k_\theta = 0,008$; $k_V = 0,003$; $k_t = 0,1$ удалось добиться решения поставленной задачи при наличии штрафной зоны (кривая 2, рис. 1). В данном случае время моделирования t_f составило 14,5 с при увеличении скорости V_x до 17,35 м/с. Изменение управления u_θ наиболее выражено с 5 по 10 с в момент обхода штрафной зоны (рис. 2).

При увеличении коэффициентов управления можно добиться более быстрого изменения управления. Решение вышерассмотренной задачи при изменении штрафной зоны и определении ее с центром в точке с координатами $(x, z) = (155, 3)$ и значениях $\beta_1 = 1000$, $\beta_2 = 100$, $\rho_1 = 1$; $\rho_2 = 1,1$; $k_\theta = 0,02$; $k_V = 0,01$; $k_t = 0,1$ достигается за $t_f = 5$ с с увеличением скорости V_x до 55 м/с. Разгон от начальной скорости движения автомобиля 16,7 м/с происходит за 2 с. Данное решение показывает гибкость применения алгоритма и необходимость учета ограничений, накладываемых на векторы управления и состояния.

Рассмотрим применение алгоритма последовательной оптимизации при переводе автомобиля из начального положения $(x, z) = (0, 5)$ в заданное положение $(x, z) = (250, 0)$ при наличии нескольких штрафных зон. Например, актуальной является задача имитирования переезда беспилотным автомобилем по узкому мосту. Для этого зададим две штрафные зоны (индекс 1 и 2 у соответствующих параметров), первую — с центром в точке с координатами $(x, z) = (50, 3)$, радиусом штрафной зоны $R_{z1} = 0,2$ м, $R_{x1} = 40$ м, вторую — с цен-

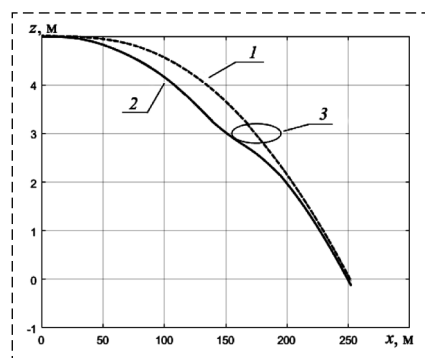


Рис. 1. Результаты моделирования $x(z)$
Fig. 1. Simulation results $x(z)$

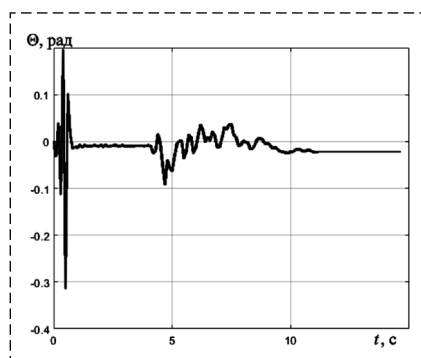


Рис. 2. Результаты моделирования $\Theta(t)$
Fig. 2. Simulation results $\Theta(t)$

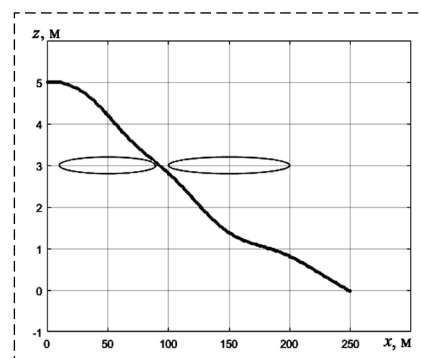


Рис. 3. Результаты моделирования $x(z)$ при наличии нескольких штрафных зон
Fig. 3. Simulation results $x(z)$ in the presence of several penalty zones

тром в точке с координатами $(x,z) = (150,3)$, радиусом штрафной зоны $R_{z2} = 0,2$ м, $R_{x2} = 50$ м. При значениях $\beta_{11} = 10$, $\beta_{21} = 10$, $\beta_{12} = 10$, $\beta_{22} = 10$, $\rho_1 = 1$; $\rho_2 = 1$; $k_0 = 0,008577$; $k_V = 0,003$; $k_t = 0,1$ происходит проезд автомобиля между штрафными зонами (рис. 3).

Данная задача успешно решалась при уменьшении расстояния между двумя штрафными зонами до 2 м без изменения коэффициентов и при различном расположении штрафных зон.

Для ускорения расчетов и выбора коэффициентов алгоритма при объезде нескольких

препятствий предпочтительнее разбивать траекторию на множество участков и решать задачи управления при объезде каждой из штрафной зоны последовательно.

Интерес вызывает объезд движущегося препятствия, в качестве которого можно рассматривать другой автомобиль. Примем, что второй автомобиль движется прямолинейно вдоль оси Ox из начальной точки $(x,z) = (40,3)$ со скоростью 10,3 м/с и имеет размеры $R_z = 0,2$ м, $R_x = 10$ м. При значениях $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 100$, $\rho_1 = 1$; $\rho_2 = 1,03$; $k_0 = 0,008$; $k_V = 0,003$; $k_t = 0,1$ происходит объезд движущегося автомобиля путем маневра с увеличением скорости V_x первого автомобиля (рис. 4, а). При значениях $\beta_1 = 10000$, $\rho_1 = 1,1$ и неизменных остальных коэффициентах происходит объезд запретной зоны путем маневра с уменьшением скорости V_x первого автомобиля (рис. 4, б).

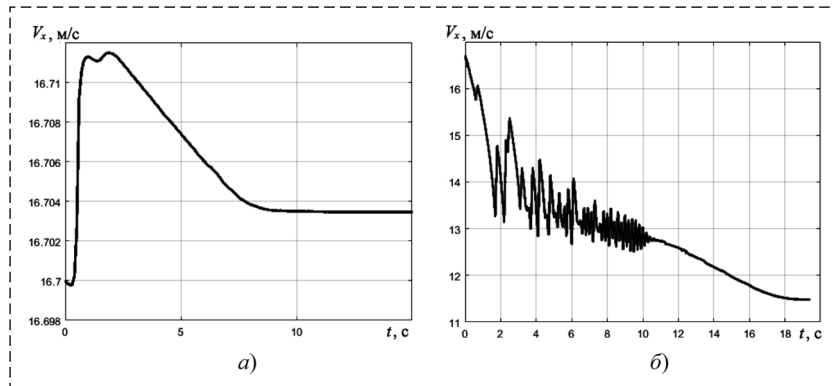


Рис. 4. Результаты моделирования $V_x(t)$

Fig. 4. Simulation results $V_x(t)$

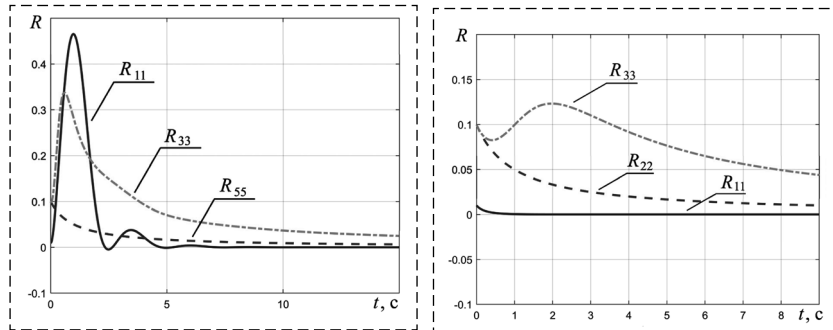


Рис. 5. Графики $R_{ii}(t)$ при $V_x(0) = 16,7$ м/с

Fig. 5. Graphics $R_{ii}(t)$ at $V_x(0) = 16,7$ m/s

Рис. 6. Графики $R_{ii}(t)$ при $V_x(0) = 3$ м/с

Fig. 6. Graphics $R_{ii}(t)$ at $V_x(0) = 3$ m/s

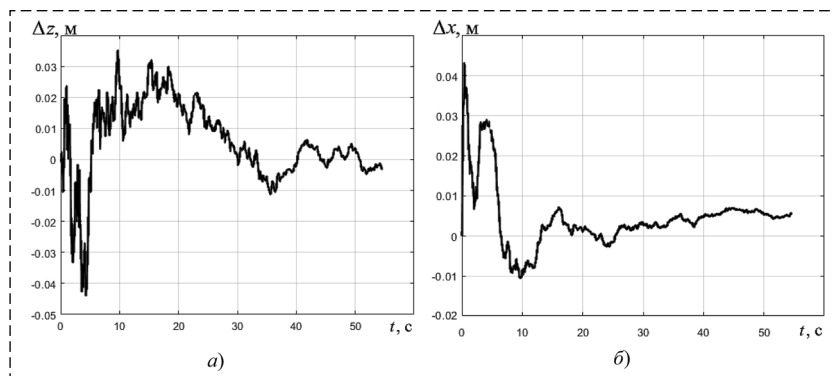


Рис. 7. Графики ошибок оценивания:

а — $\Delta z(t)$; б — $\Delta x(t)$

Fig. 7. Graphs of estimation errors:

а — $\Delta z(t)$; б — $\Delta x(t)$

Рассмотрим работу фильтра Калмана при выполнении маневра по обгону движущегося автомобиля. Примем шумы измерений со следующими интенсивностями: $\mathbf{B}_z = \text{diag}(0, 0.01, 0.1, 0, 0.01)$. На рис. 5 представлены диагональные элементы матрицы ковариации при $R_{11}(0) = 0,01$; $R_{22}(9) = 0,01$; $R_{33}(0) = 0,1$; $R_{44}(0) = 0,01$; $R_{55}(0) = 0,1$. Время прихода данных элементов к установившимся значениям занимает длительное время (около 9 с). В связи с этим шумы измерений не оказывают сильное влияние на динамику исследуемого автомобиля, что позволяет решить поставленную задачу.

При уменьшении начальной скорости движения автомобиля в два раза до $V_x(0) = 8$ м/с удается добиться установившихся значений диагональных элементов матрицы ковариации и успешного решения поставленной задачи.

На рис. 6 представлены зависимости R_{11} ; R_{22} ; R_{33} ; R_{44} ; R_{55} от времени при $V_x(0) = 3$ м/с; $k_0 = 0,0008$; $k_V = 0,007$ и неизменных остальных коэффициентах. Видно, что с течением времени они приходят к установившимся значениям. Также было проведено модели-

рование при разных уровнях шума. Фильтр Калмана обрабатывает их успешно. Шумы измерений не оказывают сильного воздействия на управление.

Удалось добиться успешного решения поставленной задачи управления при переводе автомобиля из начального положения $(x,z) = (0,5)$ в заданное положение $(x,z) = (250,0)$ при наличии штрафной зоны в виде движущегося автомобиля. Конечное время моделирования t_f увеличилось с 15 с до 54,7 с. Скорость движения управляемого автомобиля V не превышает 4,7 м/с. На рис. 7, а, б показаны графики изменения ошибки оценивания Δz и Δx , соответственно.

Примем, что возмущения не превышают $\pm 1\%$ от максимальных значений соответствующих переменных. В расчетах шумы ξ_x принимались белыми с интенсивностями $\mathbf{V}_x = \text{diag}(0, 0, 0.01, 0, 0.01)$. При наличии внешних возмущений ошибки имеют математическое ожидание, равное нулю, и дисперсию, не превышающую дисперсию возмущений.

Заключение

В результате проделанной работы было подтверждено решение задачи оптимального управления беспилотным автомобилем при наличии штрафной функции, шумов измерений и возмущений по неполным данным с использованием принципа разделения и критерия Красовского. Показано, что с помощью фильтра Калмана можно решить поставленную задачу при различных интенсивностях возмущений и шумов измерений. В дальнейшем при необходимости выделения приоритетных ограничений в терминальных условиях (например, выход к дороге, мосту и др.) целесообразно применять оптимизацию по иерархии критериев с использованием алгоритма последовательной оптимизации [15].

Для изменения активности работы измерителей в работе [19] показана возможность отключения датчиков при допустимой точности оценивания. Для рассматриваемой задачи также является актуальным интервальное наблюдение, что позволит продолжить управление при пропадании сигнала со спутника.

Представленные исследования доложены на XXVI международной научной конференции "Системный анализ, управление и навигация" [20].

Список литературы

1. Юзаева А. Г., Кукарцев В. В. Беспилотные автомобили: опасности и перспективы развития // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 2. С. 120–122.
2. Краснопевцева Н. А., Стычев С. Н., Мальцев С. А. Анализ существующих систем безопасности управления беспилотным автомобилем // Проблемы и перспективы реализации междисциплинарных исследований. Сб. статей Всеросс. науч.-практ. конф. 2019. С. 11–12.
3. Chu W., Wuniri Q., Du X., Huang T., Li K. Cloud Control System Architectures, Technologies and Applications on Intelligent and Connected Vehicles: a Review // Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). 2021. Vol. 34, N. 1. P. 1–23.
4. Павловский В. Е., Огольцов В. Н., Спиридонова И. А., Павловский Е. В. Управление беспилотным автомобилем в проекте "АВТОНИВА" // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 4 (9). С. 41–46.
5. Зубов И. Г. Обработка и анализ видеоданных в системе управления беспилотного автомобиля // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2021. № 4. С. 96–99.
6. Спиридон А. А., Волосников А. С. Обработка сигналов датчиков в системе управления беспилотным автомобилем // Наука ЮУрГУ: Секции технических наук. Матер. 73-й науч. конф. 2021. С. 465–472.
7. Chuan Z. B., Ming L. G., Wang P. S., Li Y., Peng L. H. Research on Key Technology of Auto-driving Based on Machine Vision // ACM International Conference Proceeding Series. 2021. P. 429–433.
8. Кобылинский А. Ю. Опасности и перспективы развития беспилотного автомобильного транспорта // Наука, техника и образование. 2022. № 3 (86). С. 40–44.
9. Gopinath K., Narayanamurthy G. Meta-analysis of autonomous vehicles adoption — Moderating role of automation level, ownership and culture // International Journal of Information Management. 2022. Vol. 66. P. 1–13.
10. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель / Под ред. А. А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 535 с.
11. Крашенинников Б. А. Активное оптимальное демпфирование колебаний кузова автомобиля // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 36–41.
12. Кабанов Д. С., Крашенинников Б. А. Управление траекторией автомобиля с использованием алгоритма последовательной оптимизации // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 10. С. 21–24.
13. Orisnt System. Геодзический приемник ОС-213. URL: <https://orsyst.ru/receivers/os-213> (дата обращения: 25.08.2022).
14. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
15. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб: Изд-во СПбГУ, 1997. 200 с.
16. Кабанов С. А. Оптимизация динамики систем при действии возмущений. М.: Физматлит, 2008. 200 с.
17. Кабанов Д. С. Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 5. С. 27–30.
18. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля. М.: Машиностроение, 1971. 417 с.
19. Кабанов С. А., Кабанов Д. С., Никулин Е. Н., Митин Ф. В. Оптимальное управление разведомением сплыв трансформируемого рефлектора при наличии возмущений // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 649–659.
20. Кабанов С. А., Митин Ф. В., Скворцова А. Э. Оптимальное управление беспилотным автомобилем при действии возмущений и наличии препятствий // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. М.: Изд-во МАИ, 2022. С. 121–123.

Optimization of the Course Movement of an Unmanned Vehicle in the Presence of Obstacles and Disturbances

S. A. Kabanov, kaba-sa@mail.ru, D. S. Kabanov, kabanovds@mail, F. V. Mitin, fedor28@list.ru, BSTU "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

Corresponding author: **Kabanov Sergey**, Ph.D., Dr. Sci., Professor, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: kaba-sa@mail.ru

Accepted on November 09, 2022

Abstract

The article discusses the optimization of the control process of an unmanned vehicle. Currently, there is an active development and use of unmanned vehicles. There is a practice of using unmanned shuttles in closed areas (conferences, forums, etc.). The use of cars with automated control in urban conditions and on rough terrain is being tested. In this regard, it is important to develop control algorithms that allow solving problems of car control in real time under the influence of disturbances and the presence of obstacles. With the development of technology and an increase in computing power, it becomes possible to use optimal control algorithms that allow you to achieve better results when the terminal conditions are met, minimizing energy costs. This paper shows the solution of the problem of optimal control of an unmanned vehicle in the presence of a penalty function, measurement noise and disturbances from incomplete data using the separation principle. The problem of optimal control in a deterministic and stochastic setting is solved using an algorithm with a predictive model with a generalized work functional. The effectiveness of applying the Kalman filter is shown depending on the different intensity of measurement noise and different vehicle speeds. The results of numerical modeling are presented, showing the possibility of using the proposed algorithm to control an unmanned vehicle under various initial and final conditions. The developed algorithm has been successfully applied to bypass a moving object.

Keywords: mathematical model, unmanned vehicle, control, optimization

Acknowledgements: The work was carried out in BSTU "VOENMEH" with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (government contract agreement № 075-03-2020-045/2 of 09.06.2020).

For citation:

Kabanov S. A., Kabanov D. S., Mitin F. V. Optimization of the Course Movement of an Unmanned Vehicle in the Presence of Obstacles and Disturbances, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 93–100.

DOI: 10.17587/mau.24.93-100

References

1. Yzaeva A. G., Kukarcev V. V. Unmanned vehicles: danger and prospects, *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2016, vol. 2, pp. 120–122 (in Russian).
2. Krasnopevceva N. A., Stychev S. N., Malcev S. A. Analysis of existing security systems for driving an unmanned vehicle, *Problemy i perspektivy realizatsii mezhdisciplinarnykh issledovaniy. Sbornik statej Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 2019, pp. 11–12 (in Russian).
3. Chu W., Wuniri Q., Du X., Huang T., Li K. Cloud Control System Architectures, Technologies and Applications on Intelligent and Connected Vehicles: a Review, *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2021, vol. 34, no. 1, pp. 1–23.
4. Pavlovskij V. E., Ogo'cov V. N., Spiridonova I. A. Driving an unmanned vehicle in the AVTONIVA project, *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 41–46 (in Russian).
5. Zubov I. G. Processing and analysis of video data in the control system of an unmanned vehicle, *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*, 2021, no. 4, pp. 96–99 (in Russian).
6. Spiridon A. A., Volosnikov A. S. Processing of sensor signals in the control system of an unmanned vehicle, *Nauka YUUrGU: Sekcii tekhnicheskikh nauk. materialy 73-j nauchnoj konferentsii. Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossiyskoj Federatsii YUzhno-Ural'skij gosudarstvennyj universitet*, 2021, pp. 465–472 (in Russian).
7. Chuan Z. B., Ming L. G., Wang P. S., Li Y., Peng L. H. Research on Key Technology of Auto-driving Based on Machine Vision, *ACM International Conference Proceeding Series*, 2021, pp. 429–433.
8. Kobylinskij A. Y. Dangers and prospects for the development of unmanned vehicle transport, *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2022, vol. 86, no. 3, pp. 40–44 (in Russian).
9. Gopinath K., Narayanamurthy G. Meta-analysis of autonomous vehicles adoption — Moderating role of automation level, ownership and culture, *International Journal of Information Management*, 2022, vol. 66, pp. 1–13.
10. Hachaturov A. A. ed. Dynamics of the road-tire-car-driver system, Moscow, Mashinostroenie, 535 p. (in Russian).
11. Krashenninnikov B. A. Active optimum vibration damping of the vehicle body, *Izv. VUZov. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, no. 5, pp. 36–41 (in Russian).
12. Kabanov D. S., Krashenninnikov B. A. Vehicle trajectory control using a sequential optimization algorithm, *Izv. VUZov. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, no. 10, pp. 21–24 (in Russian).
13. Orient System. Geodezicheskij priyomnik OC-213, available at: <https://orsyst.ru/receivers/oc-213> (date of the application: 25.08.2022).
14. Krasovskiy A. A. Handbook on the theory of automatic control, Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (in Russian).
15. Kabanov S. A. Controlling systems based on predictive models, St. Petersburg, St. Petersburg State University Publishing House, 1997, 200 p. (in Russian).
16. Kabanov S. A. Optimization of the dynamics of systems under the influence of perturbations, Moscow, FIZMATLIT, 2008, 200 p. (in Russian).
17. Kabanov D. S. Optimal control of a nuclear reactor subject to random disturbances, *Izv. VUZov. Priborostroenie*, 2009, vol. 52, no. 5, pp. 27–30 (in Russian).
18. Litvinov A. S. Vehicle handling and stability, Moscow, Mashinostroenie, 1971, 417 p. (in Russian).
19. Kabanov S. A., Kabanov D. S., Nikulin E. N., Mitin F. V. Optimal control of deployment of the spoke of a transformable reflector in the presence of disturbance, *Siberian Aerospace Journal*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 649–659 (in Russian).
20. Kabanov S. A., Mitin F. V., Skvortsova A. E. Optimal control of an autonomous car under the influence of disturbances and obstacles, *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigatsiya: Tezisy dokladov*, Moscow, Publishing house of MAI, 2022, pp. 121–123 (in Russian).

Е. С. Брискин^{1, 2}, д-р физ.-мат. наук, проф., dtm@vstu.ru,

Л. Д. Смирная^{1, 2}, мл. науч. сотр., dtm@vstu.ru,

К. С. Артемьев¹, лаборант-исследователь, subisinebeats@gmail.com,

¹ Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград,

² Университет Иннополис, г. Иннополис

Об управлении тяговыми характеристиками и сопротивлением движению мобильных роботов с шагающими движителями*

Рассматривается проблема повышения тягово-динамических свойств мобильных роботов с шагающими движителями. Анализируется взаимозависимость тяговых усилий, развиваемых движителями, и сил сопротивления движению роботов, обусловленных их взаимодействием с окружающей средой. Предлагается математическая модель, основанная на квазистатическом характере движения робота и учитывающая статическую неопределенность задачи. Статическая неопределенность обусловлена наличием движителей на каждом из бортов, причем число взаимодействующих с опорной поверхностью движителей больше двух. Особенностью решения является учет походки и расписания движения робота, характеризующих временную последовательность нахождения движителей в фазе взаимодействия с опорной поверхностью и в фазе переноса в новое положение. Походка характеризуется также и коэффициентом режима, являющегося отношением времени нахождения движителя в фазе опоры к полному времени цикла его движения. Вводится критерий оптимальности, на основе которого оценивается конструктивное совершенство движителей и места их установки на роботе. Критерий оптимальности состоит из двух показателей: максимального тягового усилия и средней силы сопротивления движению. Тяговое усилие принимается пропорциональным сумме максимальных нормальных нагрузок, действующих на каждый движитель, а силы сопротивления — пропорциональными квадратам тех же нагрузок. Проведено имитационное моделирование, доказывающее зависимость тяговых свойств и сил сопротивления движению от места установки движителей. Сравнились две системы вертикального расположения точек подвеса движителей. Установлено, что достаточно малое изменение вертикальной координаты точки подвеса даже одного движителя оказывает заметное влияние на изменение максимальных тяговых усилий и сил сопротивления движению. Сделаны выводы о том, что за счет регулирования вертикального положения стопы движителя относительно корпуса робота можно управлять тяговыми свойствами и сопротивлением движению, а следовательно, важна точность позиционирования стопы механизма шагания движителя в процессе движения.

Ключевые слова: мобильный робот, шагающий движитель, сила сопротивления, тяговая сила, тягово-сцепные свойства, точность позиционирования

Введение

Движитель транспортной машины можно определить как механизм, преобразующий энергию, генерируемую двигателем или внешним источником, в работу по перемещению этой машины во внешней среде за счет взаимодействия с этой средой [1, с. 132–133].

Если рассматривать транспортную машину с движителем и окружающую среду как замкнутую механическую систему, то количество движения в ней сохраняется. Поэтому для начала перемещения рассматриваемого транспортного средства из состояния покоя возникает также и движение окружающей среды, такое что суммарное количество движения равняется нулю. Усилие, необходимое для обеспечения движения транспортного средства, можно определить как тяговое, а для движения окружающей среды — как силы сопротивления [2].

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00882, <https://rscf.ru/project/22-21-00882/>

Для наземных транспортных средств с колесными или гусеничными движителями вводятся максимальная сила тяги по сцеплению и сила сопротивления движению, обусловленные взаимодействием с грунтом [3, 4]. Для шагающих машин известно выражение для осредненной силы сопротивления движению $Q_{\text{сопр}}$ [5, 6]. Максимальную силу тяги $Q_{\text{тяг. max}}$ можно оценить, если рассматривать стопы, погружающиеся в грунт на глубину, пропорциональную максимальной нагрузке $P_{j \text{ max}}$ [7]:

$$Q_{\text{сопр}} = \sum_{j=1}^N \frac{P_{j \text{ max}}^2}{2c_n l}, \quad (1)$$

$$Q_{\text{тяг. max}} = \alpha \sum_{j=1}^N P_{j \text{ max}},$$

где c_n — нормальная жесткость системы "опора движителя—опорная поверхность"; l — длина шага; α — коэффициент пропорциональности, зависящий от физико-механических свойств грунта, геометрической формы и размеров стопы [7].

Таким образом, на силу сопротивления движению и максимальную тяговую силу влияет распределение нормальных реакций, а возможность управления их значениями, благодаря статической неопределенности этой задачи при числе ног, взаимодействующих с опорной поверхностью на одном борту, более двух и дискретности взаимодействия с опорной поверхностью, является характерной особенностью роботов с шагающими движителями [8–10], чем они и отличаются от транспортных средств с традиционными типами движителей.

Постановка задачи

Рассматривается плоское движение шагающей машины в вертикальной плоскости как твердого тела (рис. 1).

Положение корпуса робота характеризуется координатами его центра масс x_c, y_c и углом поворота φ . Ось Ox лежит в условно недеформированной горизонтальной плоскости опорной поверхности. Курсовое положение стопы j движителя a_j ($j = 1, N$) относительно центра масс робота при его равномерном движении вдоль горизонтальной оси Ox со скоростью V_0 задается функцией

$$a_j = a_{j\max} - V_0(t - \tau_{Hj}), \tau_{Hj} < t < \tau_{Kj}, \quad (2)$$

где $a_{j\max}$ — положение стопы движителя в начале фазы ее взаимодействия с опорной поверхностью; τ_{Hj}, τ_{Kj} — начало и конец фазы взаимодействия стопы движителя, причем рассматривается только один цикл движения движителя

$$-\gamma T < \tau_{Hj} < T(1 - \gamma), \quad \tau_{Kj} = \tau_{Hj} + \gamma T. \quad (3)$$

На графиках (рис. 2) представлены зависимости $a_j = a_j(t)$ для двух различных случаев задания расписания движения.

В первом случае $\tau_{Hj} > 0$, и взаимодействие с опорной поверхностью имеет место при $\tau_{Hj} < t < \tau_{Hj} + \gamma T$, а при $0 < t < \tau_{Hj}$ или $\tau_{Hj} + \gamma T < t < T$ движитель находится в фазе переноса в новое положение, и $a_j = 0$.

Во втором случае $\tau_{Hj} < 0$, и взаимодействие с опорной поверхностью осуществляется при $0 < t < \tau_{Hj} + \gamma T$ и $T + \tau_{Hj} < t < T$, а при $\tau_{Hj} + \gamma T < t < T + \tau_{Hj}$ движитель находится в фазе переноса в новое положение, и $a_j = 0$.

Положение стопы j движителя, взаимодействующего с опорной поверхностью в вертикальном направлении относительно корпуса

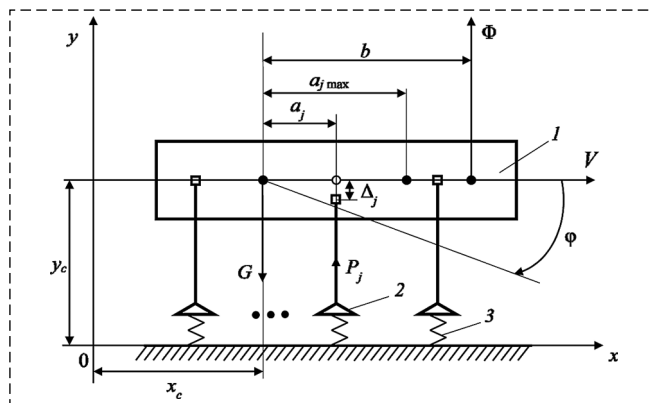


Рис. 1. Расчетная схема шагающей машины:

1 — корпус робота; 2 — опора шагающего движителя; 3 — эквивалентный упругий элемент жесткости с системы "стопа—опорная поверхность"

Fig. 1. Design scheme of the walking machine:

1 — robot body; 2 — walking propulsion device support; 3 — equivalent elastic stiffener c of the system "foot — supporting surface"

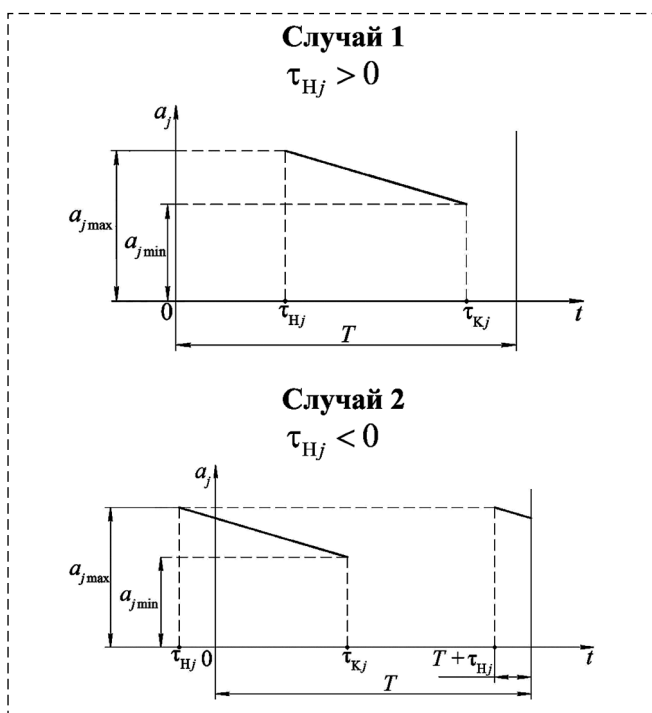


Рис. 2. Возможные изменения положения стоп движителей относительно корпуса робота

Fig. 2. Possible changes in the position of the feet of the propulsion devices relative to the robot body

робота, определяется характерной величиной S_0 . Эта величина зависит от типа движителя. Так, например, для ортогонального движителя S_0 зависит от длины опорной стойки h и ее выдвигания Δ (рис. 3).

Для циклового движителя S_0 зависит от геометрических размеров звеньев (рис. 4).

Следовательно, задавая расположение движителей $\Delta_j, a_{j\max}$, расписание их движения τ_{Hj} , скорость V , длину шага l , коэффициент режи-

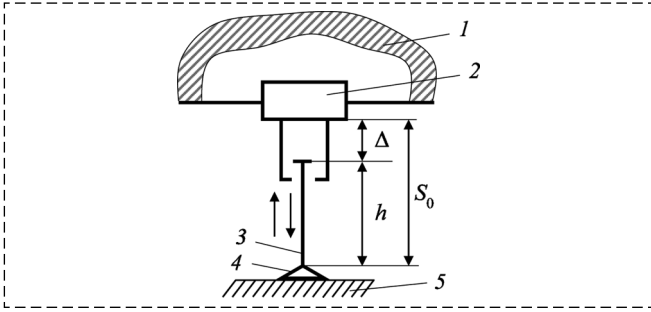


Рис. 3. Ортогональный движитель:

1 — корпус робота; 2 — каретка горизонтального привода; 3 — опорная стойка; 4 — стопа; 5 — опорная поверхность

Fig. 3. Orthogonal propulsion device:

1 — robot body; 2 — horizontal drive carriage; 3 — support stand; 4 — foot; 5 — support surface

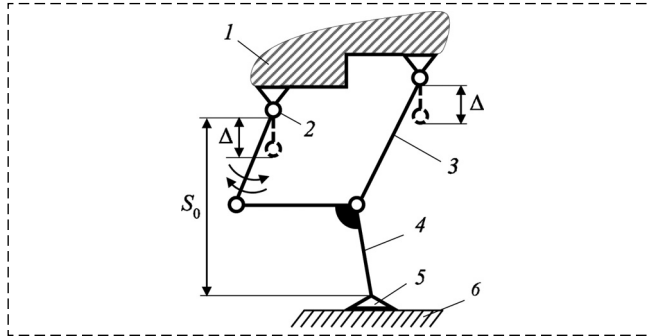


Рис. 4. Цикловой движитель:

1 — корпус робота; 2 — ведущий кривошип; 3 — коромысло; 4 — изогнутый шатун; 5 — стопа; 6 — опорная поверхность

Fig. 4. Cyclic propulsion device:

1 — robot body; 2 — driving crank; 3 — rocker; 4 — curved connecting rod; 5 — foot; 6 — support surface

ма γ , предполагаемый одинаковым для всех движителей, вес робота G , жесткость системы "опора движителя—опорная поверхность" c , а при перемещении под водой — и выталкивающую силу Φ и точку ее приложения b , можно определить нормальные реакции P_j как функции времени и найти их максимумы. При этом следует иметь в виду, что

$$T = \frac{l}{V\gamma}. \quad (4)$$

Таким образом, возможна постановка задачи о нахождении управления $\Delta_j = \Delta_j(t)$, обеспечивающего максимум критерия

$$I = Q_{\text{тяг. max}} - Q_{\text{сопр}}. \quad (5)$$

Для цикловых движителей, не имеющих индивидуального привода адаптации, определяются оптимальные расположения точек подвеса $\Delta_j = \text{const}$, обеспечивающие условие (5) на этапе проектирования, что и является предметом исследования.

Метод решения

Метод решения поставленной задачи основывается на рассмотрении квазистатического режима движения шагающего робота с постоянной горизонтальной скоростью его центра масс. Это позволяет составлять уравнения "равновесия" робота с привлечением уравнений совместности деформаций λ_j систем "опоры движителя—опорная поверхность". Усилие взаимодействия P_j движителя с опорной поверхностью определяется линейной зависимостью:

$$\begin{aligned} P_j &= c\lambda_j; \\ \lambda_j &= -y_c - \varphi a_j + (S_0 - \Delta_j). \end{aligned} \quad (6)$$

Для K движителей, находящихся в фазе переноса, $\lambda_j = 0$, а те движители, которые должны быть в фазе взаимодействия, но λ_j в соответствии с (6) меньше нуля, также не взаимодействуют с опорной поверхностью, и в расчетах принимается $\lambda_j = 0$.

Таким образом, уравнения квазистатического режима движения робота имеют вид

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^N P_j = G - \Phi; \\ \sum_{j=0}^N P_j a_j = -\Phi b. \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения (7) сводятся к системе двух линейных алгебраических уравнений с двумя неизвестными y_c^* и φ :

$$\begin{cases} y_c^*(N - K) + \varphi \sum_{j=0}^N a_j = \frac{G - \Phi}{c} + \sum_{j=0}^N \Delta_j; \\ y_c^* \sum_{j=0}^N a_j + \varphi \sum_{j=0}^N a_j^2 = -\frac{\Phi b}{c} + \sum_{j=0}^N a_j \Delta_j, \end{cases} \quad (8)$$

где $y_c^* = S_0 - y_c$.

Особенность уравнений (8) состоит в том, что при формировании коэффициентов и правых частей в различные моменты времени t величины a_j определяются в соответствии с выражением (2) и в некоторые моменты времени равны нулю. Что касается Δ_j , то если $a_j = 0$, то и $\Delta_j = 0$. В другие моменты времени Δ_j следует определять в соответствии с критерием оптимальности (5), и это является самостоятельной задачей.

Имитационное моделирование

Рассматривается мобильный робот с четырьмя шагающими движителями $N = 4$ на каждом борту. Движители расположены сим-

метрично и имеют одинаковое расписание движения.

Задаются:

- положение стоп движителей при максимальном их выдвигении $a_{1 \max} = 3$ м, $a_{2 \max} = -1$ м, $a_{3 \max} = 2$ м, $a_{4 \max} = -2$ м;
- длина шага $l = 1$ м;
- коэффициент режима $\gamma = 0,8$;
- вес робота $G = 10\,000$ Н;
- жесткость системы "опора движителя— опорная поверхность" $c = 25\,000$ Н/м²;
- время полного цикла движения движителя $T = 16$ с;
- расписание движения движителей $\tau_{Н1} = 0$ с, $\tau_{Н2} = -4$ с, $\tau_{Н3} = -7$ с, $\tau_{Н4} = 3$ с.

На графиках (рис. 5) представлена диаграмма изменения зависимости $a_j = a_j(t)$ для рассматриваемых четырех движителей. На этих графиках $a_j = 0$ для моментов времени, когда соответствующий движитель находится в фазе переноса в новое положение.

Сравниваются два случая распределения реакций $P_j = P_j(t)$.

В первом случае (рис. 6) $\Delta_j = 0$ ($j = 1, 4$).

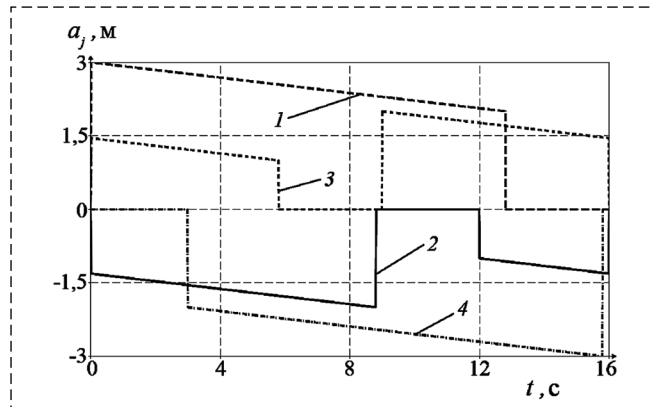


Рис. 5. Диаграмма движения движителей:

1, 2, 3, 4 — номера движителей

Fig. 5. Diagram of movement of propulsion devices:

1, 2, 3, 4 — numbers of propulsion devices

Во втором случае (рис. 7) $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_4 = 0$, $\Delta_3 = 0,05$ м.

Анализ результатов показывает, что качественное распределение реакций сохранилось. Однако максимальные значения реакций изменились. Например, в первом случае $P_{1\max} = 5150$ Н, а во втором $P_{1\max} = 5600$ Н. Поэтому и соответствующие критерии (5) претерпели изменения:

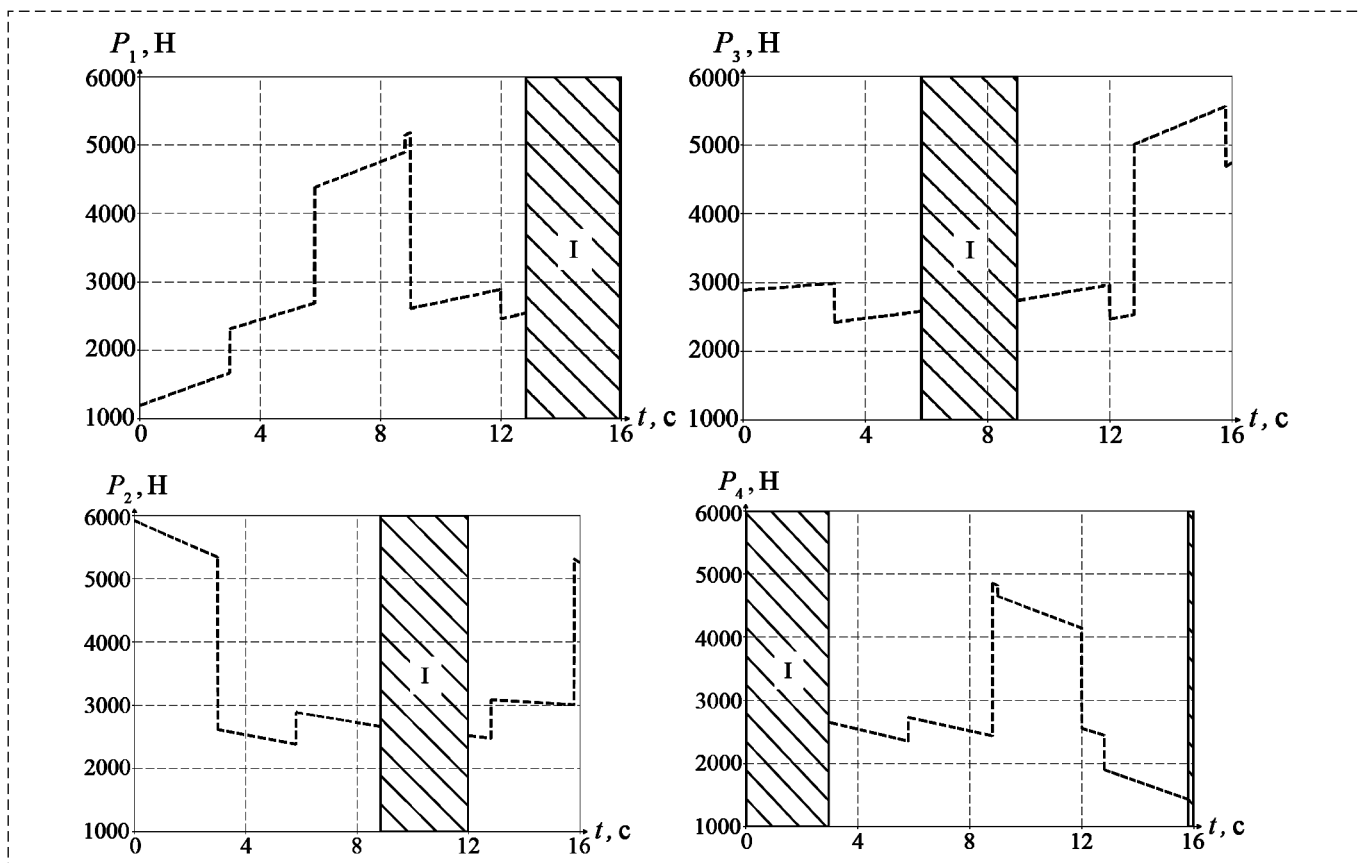


Рис. 6. Зависимости нормальных реакций взаимодействия движителей с опорной поверхностью в первом случае: I — область, соответствующая фазе отсутствия взаимодействия движителя с опорной поверхностью

Fig. 6. Dependences of normal reactions of interaction of propulsion devices with the supporting surface in the first case: I — the area corresponding to the phase of the absence of interaction between the propulsion device and the support surface

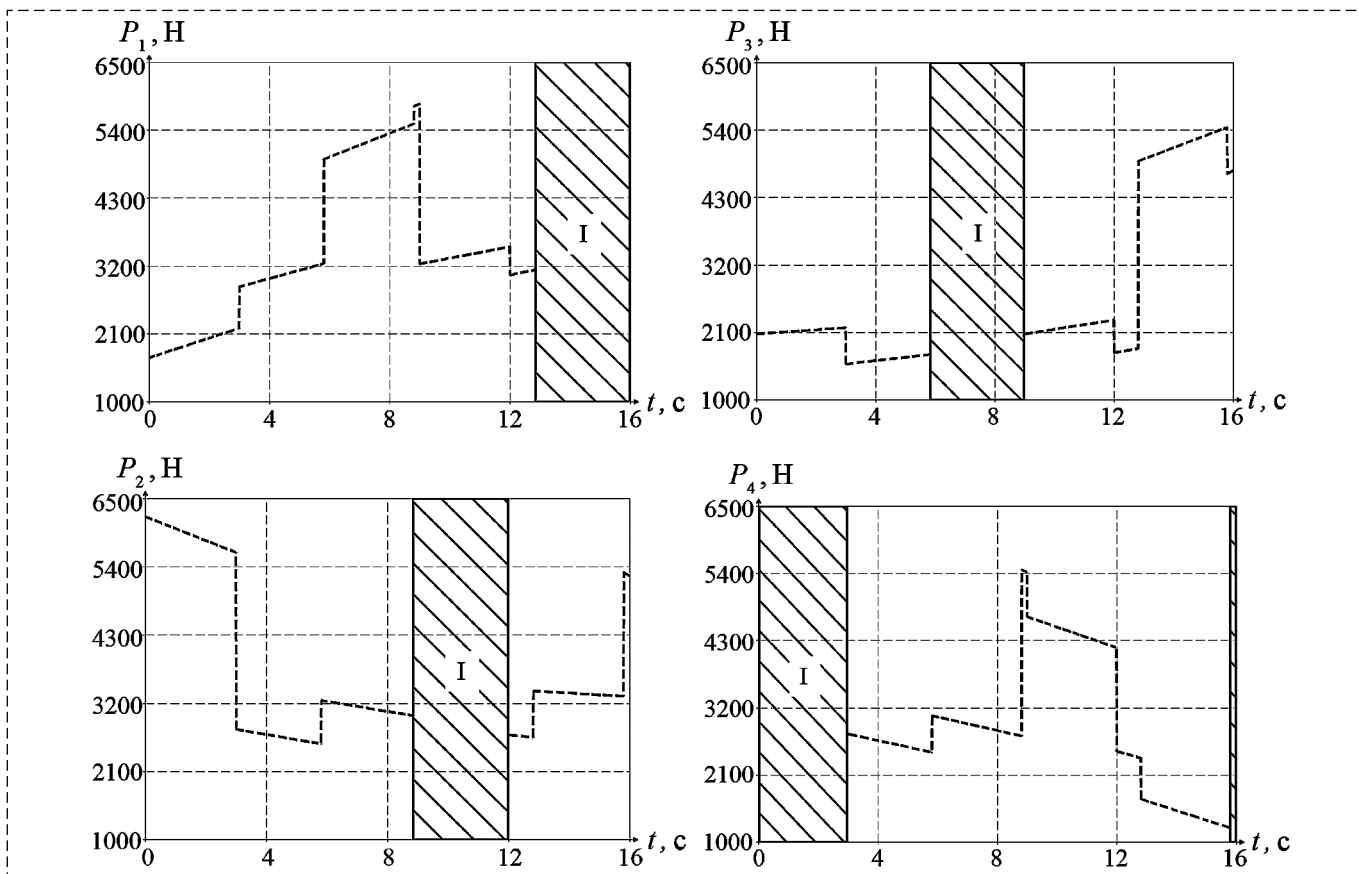


Рис. 7. Зависимости нормальных реакций взаимодействия движителей с опорной поверхностью во втором случае: I — область, соответствующая фазе отсутствия взаимодействия движителя с опорной поверхностью

Fig. 7. Dependences of normal reactions of interaction of propulsion devices with the supporting surface in the second case: I — the area corresponding to the phase of the absence of interaction between the propulsion device and the support surface

$Q_{\text{сопр } 1} = 2318 \text{ Н}$, $Q_{\text{сопр } 2} = 2640 \text{ Н}$, т. е. сила сопротивления движению во втором случае возрастает на 13,8 %. Что касается максимальной силы тяги, то она также возрастает, но на 6,8 %.

Заключение

За счет регулирования вертикального положения стопы движителя относительно корпуса робота можно управлять силой сопротивления движению и максимальной тяговой силой. Устанавливать вертикальное положение стопы относительно корпуса робота можно на стадии проектирования или в процессе движения, но в последнем случае необходим дополнительный привод.

Реализация предложенного метода повышения тягово-сцепных свойств шагающих движителей и снижения сил сопротивления предъявляет повышенные требования к точности позиционирования стоп механизмов шагания в процессе движения робота.

Список литературы

1. Политехнический словарь / Гл. ред. акад. И. И. Артоболевский. М.: Сов. энциклопедия, 1976. 608 с.
2. Брискин Е. С., Серов В. А., Шаронов Н. Г., Пеньшин И. С. Об особенностях управления движением мобильных роботов с движителями якорно-тросового типа // Экстремальная робототехника. 2017. Т. 1, № 1. С. 336–343.
3. Гуськов В. В., Велев Н. Н., Атаманов Ю. Е. и др. Тракторы: Теория: "Автомобили и тракторы" / Под общ. ред. В. В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1988. 374 с.
4. Смирнов Г. А. Теория движения колесных машин. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
5. Игнатъев М. Б., Кулаков Ф. М., Покровский А. М. Алгоритмы управления роботами-манипуляторами. М.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1972. 248 с.
6. Брискин Е. С. Об общей динамике и повороте шагающих машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1997. № 6. С. 33–39.
7. Брискин Е. С., Жога В. В., Чернышев В. В., Малолетов А. В. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями. М.: Машиностроение, 2009. 191 с.
8. Гориневский Д. М., Шнейдер А. Ю. О динамике малых движений шагающего аппарата при наличии обратной связи по опорным реакциям // Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. 1987. № 6. С. 397.
9. Шнейдер А. Ю., Гориневский Д. М. Управление опорными реакциями шагающего аппарата при движении по грунтам с различными несущими свойствами // Институт проблем передачи информации АН СССР. Препринт. М.: ИППИ. 1986. 72 с.
10. Смирная Л. Д. Об оптимальном распределении нормальных реакций шагающих движителей подводных роботов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 3(226). С. 47–50.

On the Control of Traction Characteristics and Resistance to Movement of Mobile Robots with Walking Propulsion Devices

E. S. Briskin^{1, 2}, dtm@vstu.ru, L. D. Smirnaya^{1, 2}, dtm@vstu.ru, K. S. Artemyev¹, subisinebeats@gmail.com,
¹Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation,
²Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation

Corresponding author: **Briskin Evgeniy S.**, Dr. of Phys.-Math. Sc., Professor,
Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation, e-mail: dtm@vstu.ru

Accepted on November 09, 2022

Abstract

The problem of increasing the traction and dynamic properties of mobile robots with walking propulsion devices is considered. The interdependence of the traction forces developed by the propulsion devices and the forces of resistance to the movement of robots, due to their interaction with the environment, is analyzed. A mathematical model is proposed based on the quasi-static nature of the robot's movement and taking into account the static uncertainty of the problem. Static indeterminacy is due to the presence of propulsion devices on each of the sides and interacting with the supporting surface in the amount of more than two. A feature of the solution is also taking into account the gait and schedule of the robot's movement, which characterize the time sequence of the propulsion devices being in the phase of interaction with the supporting surface and in the phase of transfer to a new position. The gait is also characterized by the mode coefficient, which is the ratio of the time the propulsion device is in the stance phase to the total time of the cycle of its movement. An optimality criterion is introduced on the basis of which the design perfection of the propulsion devices and the place of their installation on the robot is evaluated. The optimality criterion consists of two indicators: the value of the maximum traction force and the average force of resistance to movement. The tractive force is assumed to be proportional to the sum of the maximum normal loads acting on each propulsion device unit, and the resistance force to the squares of the same loads. Simulation modeling has been carried out, proving the dependence of the magnitude of traction properties and the forces of resistance to movement on the location of the propulsion devices. Two systems of vertical arrangement of the points of suspension of propulsion devices were compared. It has been established that a sufficiently small change in the vertical coordinate of the suspension point of even one propulsion devices has a noticeable change in the maximum traction forces and movement resistance forces. It is concluded that by adjusting the vertical position of the propulsion devices foot relative to the robot body, it is possible to control the traction properties and movement resistance, as well as the importance of the positioning accuracy of the foot of the propulsion devices walking mechanism during movement.

Keywords: mobile robot, walking propulsion device, resistance force, traction force, traction properties, positioning accuracy

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-21-00882, <https://rscf.ru/en/project/22-21-00882/>.

For citation:

Briskin E. S., Smirnaya L. D., Artemyev K. S. On the Control of Traction Characteristics and Resistance to Movement of Mobile Robots with Walking Propulsion Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 101–106.

DOI: 10.17587/mau.24.101-106

References

1. **Artobolevsky I. I.** ed. Polytechnic dictionary, Moscow, Soviet Encyclopedia, 1976, 608 p. (in Russian).
2. **Briskin E. S., Serov V. A., Sharonov N. G., Peshin I. S.** About the features of motion control of mobile robots with anchorable propulsion devices, *Ekstremal'naya robototekhnika*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 336–343 (in Russian).
3. **Guskov V. V., Velev N. N., Atamanov Yu. E.** et al. Tractors: Theory: "Cars and tractors", Moscow, Mashinostroyeniye, 1988, 374 p. (in Russian).
4. **Smirnov G. A.** Theory of motion of wheeled vehicles, Moscow, Mashinostroyeniye, 1990, 352 p. (in Russian).
5. **Ignatiev M. B., Kulakov F. M., Pokrovsky A. M.** Control algorithms for robotic manipulators, Moscow, Mashinostroyeniye, Leningrad department, 1972, 248 p. (in Russian).
6. **Briskin E. S.** On the general dynamics and rotation of walking machines, *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 1997, no. 6, pp. 33–39 (in Russian).
7. **Briskin E. S., Zhoga V. V., Chernyshev V. V., Maloletov A. V.** Dynamics and motion control of walking machines with cyclic movers, Moscow, Mashinostroyeniye, 2009, 191 p. (in Russian).
8. **Gorinevsky D. M., Shneider A. Yu.** On the dynamics of small movements of a walking apparatus in the presence of feedback on support reactions, *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela*, 1987, no. 6, pp. 397 (in Russian).
9. **Shneider A. Yu., Gorinevsky D. M.** Control of the support reactions of a walking apparatus when moving on soils with different non-existent properties, Institut problem peredachi informatsii AN SSSR, Preprint, Moscow, IPPI, 1986, 72 p. (in Russian).
10. **Smirnaya L. D.** On the optimal distribution of normal reactions of walking propellers of underwater robots, *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, no. 3(226), pp. 47–50 (in Russian).

K. A. Neusypin, neysipin@mail.ru, **A. V. Proletarsky**, pav_mipk@mail.ru,
M. S. Selezneva, m.s.selezneva@mail.ru,
Department of Informatics and Control Systems Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Selezneva Maria S., Associated Professor of the Department
"Informatics and Control Systems", Bauman Moscow State Technical University, Cand. of Tech. Sc.,
Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: *m.s.selezneva@mail.ru*

Accepted on November 02, 2022

Algorithms for Complexing an Inertial Navigation System with Angular Acceleration Sensors

Abstract

In this paper the problem of increasing the accuracy of inertial navigation system of an aircraft in the absence of high-precision additional information sensors, such as GPS, has been studied. It is proposed to install angular acceleration sensors on the gyro-stabilized platform of the inertial navigation system. The use of signals from the angular acceleration sensors made it possible to generate correction signals for the inertial navigation system. Correction algorithms have been developed in the structure of the inertial navigation system and in its output signal. The effectiveness of the developed algorithms has been demonstrated using semi-natural simulation with the Ts060K inertial navigation system.

Keywords: *aircraft, inertial navigation system, angular acceleration sensor, correction, error compensation algorithms, semi-natural simulation*

For citation:

Neusypin K. A., Proletarsky A. V., Selezneva M. S. Algorithms for Complexing an Inertial Navigation System with Angular Acceleration Sensors, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 107–112.

DOI: 10.17587/mau.24.107-112

УДК 681.513

DOI: 10.17587/mau.24.107-112

К. А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, neysipin@mail.ru,
А. В. Пролетарский, д-р техн. наук, проф., декан, pav_mipk@mail.ru,
М. С. Селезнева, канд. техн. наук, доц., m.s.selezneva@mail.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Алгоритмы комплексования инерциальной навигационной системы с датчиками угловых ускорений

Исследована задача повышения точности платформенной инерциальной навигационной системы летательного аппарата в условиях отсутствия высокоточных дополнительных датчиков информации, например GPS. Предложено установить на гиросtabilизированную платформу инерциальной навигационной системы датчики угловых ускорений. Использование сигналов с датчиков угловых ускорений позволило сформировать сигналы коррекции для инерциальной навигационной системы. Разработаны алгоритмы коррекции в структуре инерциальной навигационной системы и в ее выходном сигнале. Эффективность разработанных алгоритмов продемонстрирована с помощью полунатурного моделирования с инерциальной навигационной системой Ц060К.

Ключевые слова: *летательный аппарат, инерциальная навигационная система, датчик угловых ускорений, коррекция, алгоритмы компенсации ошибок, полунатурное моделирование*

Introduction

Aircraft control is carried out on the basis of information about its location, speed, acceleration and orientation angles. This information is obtained from various measuring systems. Aircraft measuring systems are based on various physical principles [1, 2], one of the most common types of aircraft measuring systems are gyroscopic systems [1, 3]. Gyroscopic systems, in particular gyro-stabilized platforms (GSPs), make it possible to materialize the accompanying trihedron of coordinate system in which the parameters of orientation and navigation of the aircraft are determined. For example, an inertial navigation system (INS) consists of a GPS and accelerometers installed on it [4, 5]. With the help of the GPS, the given orientation of accelerometers along the axes of accompanying trihedron of selected coordinate system is determined. INS tuned to the Schuler period is invariant to horizontal accelerations, but its errors increase with time, which is due to gyroscope drift, zero offset and accelerometer drift, as well as other perturbing factors. INS with high-precision gyroscopes and accelerometers has higher accuracy, however cost more. When the applied INS on aircraft with elements of low accuracy, the accuracy of INS can be significantly improved by attracting additional information from various sensors and systems.

Currently, for the correction of aircraft measuring complex, it is usually proposed to use classical estimation algorithms. As a rule, this is the Kalman filter and its various adaptive modifications [6–8]. However, these filters can not allow correction of aircraft measuring complex when the signal from an external source is temporarily absent. Over time, the GSP deviation angles increase and the parameter readings of INS become unreliable [1, 9], and a significant increase in the accuracy characteristics of INS can be achieved with the corrective devices [10, 11].

The reference coordinate system is implemented by GSP. However, the GSP deviates from the given position due to gyroscope drift, zero offset and accelerometer drift, and errors of the first integrator. A significant increase in the angles of deviation of GSP leads to the drift of GSP, in this case, moments of residual imbalance around the precession axes of gyroscopes, anisoelectricity of the GSP, and gyroscopes during oscillation and vibration of the base all will lead to the drift of GSP. Considering that errors of the autonomous INS increase with time, in order to obtain reliable information about the orientation of aircraft, it is necessary to

compensate for deviations of GPS from the given position.

The most common INS correction scheme involves the application of Global Positioning System (GPS) [12, 13], while, GPS signals are subject to active and passive interference, therefore, it is not possible to receive reliable navigation information from GPS.

In the absence of GPS signals, other sensors can be considered and applied to correct INS, for example, angular acceleration sensors (AAS). The use of AAS for integration with INS can significantly improve the accuracy of navigation information and information about the orientation of aircraft with low-cost INS elements. For that, algorithms for INS complex with AAS need to be developed. The paper proposes two algorithms for complexing. The first correction algorithm in the INS structure, and the second algorithm can help to carry out a correction in the INS output signal.

The efficiency of the developed algorithms for complexing has been validated through semi-natural simulation. Two series of experiments are conducted with a serial INS Ts060K: the first series — INS is installed on a fixed base, and the second ones — INS is installed on the stand and the mode of the oscillating base is set. Results of the experiment are presented in this paper, the accuracy of INS with AAS is compared with an autonomous INS, an INS with correction in the output signal using an adaptive Kalman filter [6–8] and an INS with correction in the structure using a controller [14, 15]. When correcting the INS with Kalman filter and the controller, GPS signals are used, this correction is often applied and allows to get the highest possible accuracy. When there are no GPS signals, it is suggested to use AAS. The possibilities of the developed algorithms are shown in comparison with INS without correction and INS and GPS with the most effective correction.

This paper organizes as following structure. The first section is devoted to the development of an algorithm for integrating INS with AAS and a correction algorithm in the INS structure is formed. In the second section, a method for correcting the output signal of INS is proposed. The third section contains information about a semi-natural experiment that proves the effectiveness of the developed algorithms. The conclusions contain a brief summary of the work.

Prospects for further research are related to the study of proposed algorithms under the conditions of a flight experiment, as well as a more detailed study of the processes of accumulation of INS errors using nonlinear INS error equations

Algorithm for complexing INS with AAS during correction in the structure of INS

Improving the stabilization accuracy of GSP used in the INS is achieved by introducing a significant number of corrections to the readings of system elements during the prelaunch preparation of INS. The introduction of corrections is associated with the accuracy of their calculation and implementation, in addition, with the scarce time consumption. In this regard, there is a need to find other methods to improve the accuracy of GSP. One of such methods can be the use of angular acceleration sensors (AAS) as such external information sensors in the INS correction scheme. The installation of three AAS devices with orthogonal measuring axes on the GSP allows obtaining information about the angular movements of GSP, which can be implemented to correct the position of platform in space.

In this scheme, correction will be carried out by applying signals, the signals are generated according to the readings of AAS both to the corresponding torque sensors of GPS gyroscopes, and to the output information of INS. Therefore, It is possible to correct the signals of accelerometers installed on the GSP or their integrals with time.

The possibility of correcting INS of GSP by introducing information from AAS is considered. Installing three AAS with orthogonal measuring axes on the GSP allows to obtain information about the deviations of GSP from the initial position in inertial space. Signals received from AAS in the formation of corrective signals are delivered to the corresponding torque sensors of gyroscopes, and will lead to the precession of GSP in the direction of reducing stabilization errors. Here we consider such possibilities on the example of a simplified equation of AAS motion and the precessional motion of one GSP channel:

$$k_m \theta = J_m \ddot{\alpha} M_m; \quad H \dot{\alpha} = M_\delta + M_k, \quad (1)$$

where α — angle of deviation of GSP from the initial position in inertial space; θ — angle of deviation of the sensitive mass of AAS relative to the GSP; H is the own kinetic momentum of GSP gyroscope; k_m — rigidity of electric spring of AAS; M_δ — external perturbing moment around the gyroscope precession axis; M_k — corrective moment around the gyroscope precession axis; J_m — inertial moment of the sensitive mass of AAS relative to the suspension axis; M_m — external perturbing moment around suspension axis of the sensitive mass of AAS.

The correction signals are generated from information of ASS, and they are transferred to the torque sensor of GSP gyroscope: $M_k = M_k(\theta)$. Then expressions (1) can be written in the following form:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha} &= \frac{M_k(\theta)}{H} + \frac{M_\delta}{H} \\ \theta &= -\frac{J_m}{k_m} \ddot{\alpha} + \frac{M_m}{k_m} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

suppose

$$M_k(\theta) = k_2 \iint \theta(dt)^2. \quad (3)$$

Substitute eq. (3) in the second equation of system (2), and then into the first equation of system (2), we have

$$\dot{\alpha} + \frac{J_m k_2}{H k_m} \alpha = \frac{M_\delta}{H} + \frac{k_2}{H k_m} \iint M_m(dt)^2.$$

For the case in conditions

$$M_p^* = \text{const}; \quad M_m^* = \text{const}; \quad \alpha(0) = \alpha_0.$$

The solution of equations has the following form:

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= -\frac{H k_m M_m^*}{J_m^2 k_2} t + \frac{M_m^2}{2 J_m} t^2 + \\ &+ \left(\frac{k_m M_\delta^*}{J_m k_2} + \frac{H^2 k_m^2}{J_m^3 k_2^2} \right) \left(1 - e^{-\frac{J_m k_2 t}{k_m}} \right) + \alpha_0 e^{-\frac{J_m k_2 t}{k_m}}. \end{aligned}$$

Thus, when GSP is corrected in eq. (3), the perturbing moments around gyroscope precession axes no longer lead to an increase in GSP stabilization errors, but the systematic errors of AAS still have a significant effect on the stabilization accuracy. In this situation, when the systematic errors of AAS are small or practically absent, which is possible with an appropriate choice of the coefficient k_2 , a significant increase in the accuracy of GSP stabilization compared to an uncorrected system can be obtained, and for this, an inequality should be satisfied as

$$k_2 \gg \frac{k_m M_\delta^*}{J_m}.$$

The possibilities of GSP correction based on information from AAS to improve accuracy of GSP stabilization are largely related to the accuracy of AAS. High-precision AAS will reduce GSP stabilization errors caused by the systematic drift of gyroscopes. Also, it follows from this that the GSP corrected by AAS signals in the form (3) does not require the installation of precision gyroscopes on it.

Correction of ins by ass signals in the output signal of ins

Now we consider correction of the output information of INS accelerometers by the signals of AAS. The output information of INS accelerometers are apparent accelerations, measuring axes of accelerometers are rigidly connected to the GSP. Therefore, in the presence of GSP stabilization errors, accelerometers that measure the apparent accelerations of basic motion not along the axes of accompanying trihedron by the accepted navigation coordinate system, but along the axes rigidly connected to GSP, and which depend on the GSP stabilization errors will be contained in the output information components.

Define that $\dot{v}_\xi, \dot{v}_\eta, \dot{v}_\zeta$ are projections of apparent motion acceleration on the axis of accompanying trihedron, $\dot{v}_x, \dot{v}_y, \dot{v}_z$ are projections of apparent acceleration on the axis of GSP. Taking into account the matrix of direction cosines [16, 17], following dependencies between the indicated projections are obtained:

$$\begin{aligned}\dot{v}_x &= \dot{v}_\xi + \dot{v}_\eta \alpha - \dot{v}_\zeta \mu + \Delta \dot{v}_x, \\ \dot{v}_y &= \dot{v}_\eta - \dot{v}_\xi \alpha + \dot{v}_\zeta \beta + \Delta \dot{v}_y, \\ \dot{v}_z &= \dot{v}_\zeta + \dot{v}_\xi \mu - \dot{v}_\eta \beta + \Delta \dot{v}_z.\end{aligned}\quad (4)$$

Here $\Delta \dot{v}_i$ ($i = x, y, z$) are accelerometer measurement errors. Thus, stabilization errors in GSP lead to errors in determining the projection of apparent acceleration on the axis of accompanying trihedron, and we designate them as

$$\begin{aligned}\delta v_x &= v_\eta \alpha - v_\zeta \mu + \Delta v_x, \\ \delta v_y &= -v_\xi \alpha - v_\zeta \beta + \Delta v_y, \\ \delta v_z &= v_\xi \mu - v_\eta \beta + \Delta v_z.\end{aligned}\quad (5)$$

The task is about at least partially compensate for the errors by eq. (5).

Information from the AAS, and measuring axes of which are collinear to the axes of GSP, will makes it possible to generate compensation signals that are close in magnitude to the errors in eq. (2), and thereby partially compensate them.

If the signal from AAS is formed by analogy with (3) and presented in the following form:

$$\begin{aligned}u_x &= -k_3 \iint \theta_x(dt)^2, \\ u_y &= -k_3 \iint \theta_y(dt)^2, \\ u_z &= -k_3 \iint \theta_z(dt)^2,\end{aligned}\quad (6)$$

where

$$\begin{aligned}\theta_x &= -\frac{J_m}{k_m} \ddot{\beta} + \frac{M_{xm}}{k_m}, \\ \theta_y &= -\frac{J_m}{k_m} \ddot{\mu} + \frac{M_{ym}}{k_m}, \\ \theta_z &= -\frac{J_m}{k_m} \ddot{\alpha} + \frac{M_{zm}}{k_m}.\end{aligned}\quad (7)$$

Coefficient k_3 is chosen as $k_3 = \frac{k_m}{J_m}$.

Taking into account coefficient k_3 , after substituting expressions (7) in (6) and integration, the expressions for signals with AAS can be obtained in following expression:

$$\begin{aligned}u_x &= \beta - \frac{1}{J_m} \iint M_{xm}(dt)^2, \\ u_y &= \mu - \frac{1}{J_m} \iint M_{ym}(dt)^2, \\ u_z &= \alpha - \frac{1}{J_m} \iint M_{zm}(dt)^2.\end{aligned}\quad (8)$$

The constants of integration are considered in the last components.

Using information from accelerometers and AAS located on the GSP, it is possible to generate compensation signals $\delta \dot{v}_{xk}, \delta \dot{v}_{yk}, \delta \dot{v}_{zk}$ according to the following rules:

$$\left. \begin{aligned}\delta \dot{v}_{xk} &= \dot{v}_y u_z - \dot{v}_z u_y \\ \delta \dot{v}_{yk} &= -\dot{v}_x u_z + \dot{v}_z u_x \\ \delta \dot{v}_{zk} &= \dot{v}_x u_y - \dot{v}_y u_x\end{aligned}\right\} \quad (9)$$

The supply of signals in eq. (9) with opposite signs to the output information of INS accelerometers means allow to compensate for the main components of errors.

INS correction in the output information has an advantage over correction in the system structure, since it does not affect the GSP dynamics. The integration of INS in AAS could improve the accuracy of obtaining navigation information about the aircraft. The presented method is expedient to apply in conditions when information about the navigation parameters of a dynamic object cannot be received from more accurate sensors, such as GPS.

Results of semi-natural simulation

For the purpose of checking the function performance and quality of the proposed algorithms,

results of semi-natural simulation with a real INS Ts060K are used. In the process of installing INS on the basis of the stand, the accuracy characteristics of system in statics are determined.

Since the system is installed on a fixed base, the position and velocity outputs are correspondingly INS errors. Navigation information is removed from the output and display unit visually after 5 minutes.

At the output of INS, errors in velocity, the deviation angles of GSP from the horizon plane are registered.

Modeling according to the data of a laboratory experiment is carried out using a nonlinear Kal-

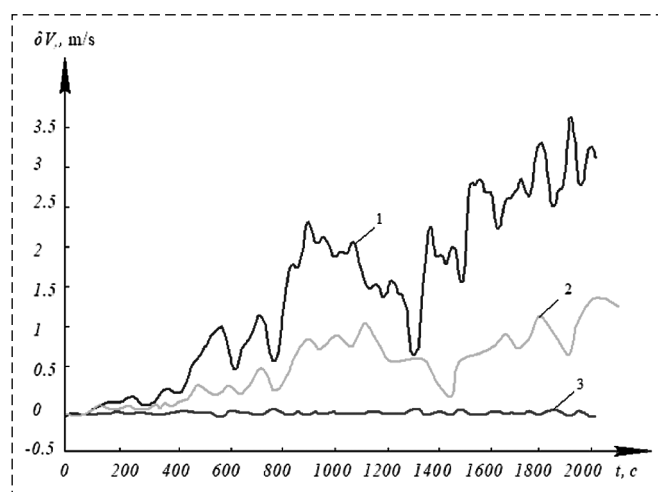


Fig. 1. The simulation result of INS error in offline mode and with correction, where 1 — INS error in determining velocity in autonomous mode (without correction); 2 — INS error in determining velocity after correction using the control algorithm [18–20]; 3 — INS error with correction in the structure from AAS

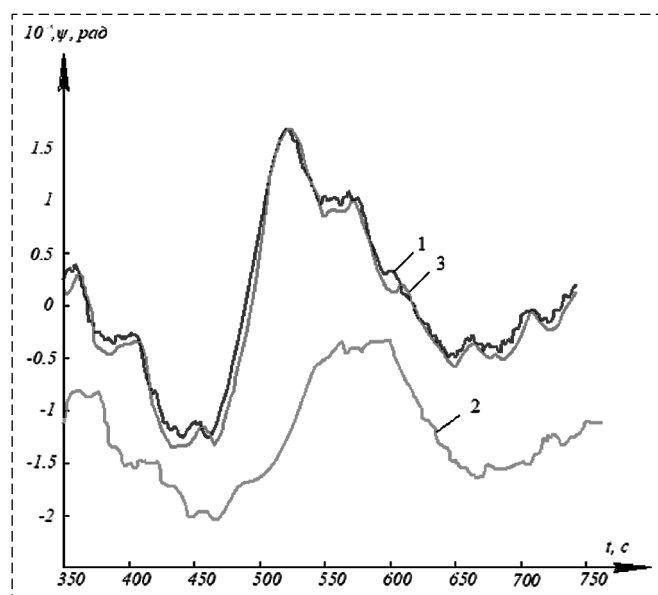


Fig. 2. Deviation angles of GSP, where 1 — deviation angles of GSP of the real system; 2 — estimations of the GPS deviation angle using adaptive Kalman filter [3]; 3 — deviation angle of GPS with correction from AAS in the output signal

Accuracy of INS correction using AAS in the structure, and a linear adaptive Kalman filter

Complexing system	Correction accuracy on a fixed base 65 %	Correction accuracy on a oscillating base 68 %
INS + AAS in sturcture		
INS + AAS in output signal	70 %	60 %
INS + GPS	85 %	72 %

man filter. The simulation results are presented in Fig. 1, 2.

The correction accuracy of INS using AAS, linear adaptive Kalman filter is shown in the Table.

When the INS is corrected by GPS signals with Kalman filter, the measurement sample contained 15 % of anomalous measurements.

Analysis of simulation results

The results of semi-natural modeling have demonstrated high efficiency of the developed complexing algorithms, accuracy of INS correction using GPS and the adaptive Kalman filter is the highest. While when it is not possible to use GPS signals, an autonomous INS is applied. Autonomous INS errors are large and increase over time. Therefore, it is proposed to reduce them by combining INS with AAS, and complexing algorithms have been developed. The effectiveness of the proposed correction algorithms is explained by the fact that in the absence of GPS signals, it is possible to increase the accuracy of navigation determinations of aircraft velocity by an average of 30 %; angle of deviation of the GSP — 45 %. These values are obtained in comparison with the autonomous INS Ts060K.

Conclusion

Simple algorithms for combining INS and AAS have been developed in this paper. These algorithms could carry out INS correction in the absence of high-precision additional navigation systems such as GPS. Algorithms for integrating INS with AAS are proposed, which make it possible to carry out correction in the INS structure and in its output signal. The effectiveness of the proposed algorithms has been verified using a semi-natural experiment with a serial platform INS Ts060K. Based on the results of experiment, it can be concluded that the integration algorithm in the INS structure is more accurate under the conditions of aircraft maneuvering. In the horizontal flight of the aircraft at a

constant velocity, the correction algorithm in INS output signal shows a higher accuracy. For further verification, this conclusion needs to be confirmed under the conditions of a flight experiment.

References

1. **Shen K.** et al. Research on high-precision measurement systems of modern aircraft, *Russian Aeronautics*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 279–286.
2. **Barbieri L.** et al. Intercomparison of small unmanned aircraft system (sUAS) measurements for atmospheric science during the LAPSE-RATE campaign, *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 9, pp. 2179.
3. **Zhang L.** et al. A new adaptive Kalman filter for navigation systems of carrier-based aircraft, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, vol. 35, no. 1, pp. 416–425.
4. **Javis R. A., Byrne J. C.** Robot Navigation: Touching, seeing, and knowing, *Proc. 1st Australian conference on artificial intelligence*, 1986, vol. 69, pp. 18–20.
5. **Chen D.** et al. New algorithms for autonomous inertial navigation systems correction with precession angle sensors in aircrafts, *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 22, p. 5016.
6. **Jazwinski A. H.** Stochastic processes and filtering theory, New York, Dover Publications, 2007.
7. **Madyastha V.** et al. Extended Kalman filter vs. error state Kalman filter for aircraft attitude estimation, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2011, p. 6615.
8. **Shakhtarin B. I., Shen Kai, Neusybin K. A.** Modification of the nonlinear Kalman filter in a correction scheme of aircraft navigation systems, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 11, pp. 1252–1258.
9. **Selezneva M. S., Neusybin K. A.** Development of a measurement complex with intelligent component, *Measurement Techniques*, December 2016, vol. 59, no. 9, pp. 916–922.
10. **Kortunov V. I.** et al. Integrated mini INS based on MEMS sensors for UAV control, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 41–43.
11. **Wang J.** et al. Integration of GPS/INS/vision sensors to navigate unmanned aerial vehicles, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, vol. 37, p. B1, pp. 963–969.
12. **Hiliuta A., Landry R., Gagnon F.** Fuzzy corrections in a GPS/INS hybrid navigation system, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, vol. 40, no. 2 pp. 591–600.
13. **Schmidt G. T., Phillips R. E.** INS/GPS integration architectures, Lexington MA, Massachusetts inst of tech, 2010.
14. **Chen D., Neusybin K. A., Selezneva M. S.** Correction Algorithm for the Navigation System of an Autonomous Unmanned Underwater Vehicle, *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 8, pp. 2365.
15. **Yang G.** et al. Development of the measuring complex with reduced regulator, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2019, vol. 1311, no. 1, p. 012037.
16. **Premerlani W., Bizard P.** Direction cosine matrix imu: Theory, *Diy Drone: Usa*, 2009, pp. 13–15.
17. **Bar-Itzhack I. Y., Fegley K. A.** Orthogonalization techniques of a direction cosine matrix, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1969, no. 5, pp. 798–804.
18. **Neusybin K. A., Selezneva M. S., Tsibizova T. Y.** Diagnostics algorithms for flight vehicles navigation complex, *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, IEEE, 2018, pp. 1–6.
19. **Kortunov V. I.** et al. Integrated mini INS based on MEMS sensors for UAV control, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 41–43.
20. **Groves P. D., Mather C. J., Macaulay A. A.** Demonstration of non-coherent deep INS/GPS integration for optimised signal-to-noise performance, *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007)*, 2007, pp. 2627–2638.

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская тишина, 23с2

Телефон редакции журнала: +7(499) 270 16 52

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

Сдано в набор 29.11.2022. Подписано в печать 13.01.2023. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Заказ МН223. 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