

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Том 18
2017
№ 7

Рисунки к статье В. Г. Градецкого, М. М. Князькова, Л. Н. Кравчука,
А. А. Крюковой, Е. А. Семенова, А. Н. Суханова, В. Г. Чашухина

**«УПРАВЛЯЕМОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ВАКУУМА В УСТРОЙСТВАХ
СЦЕПЛЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЯМИ ПРИ ДВИЖЕНИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ
С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ПРИЖИМОМ»**

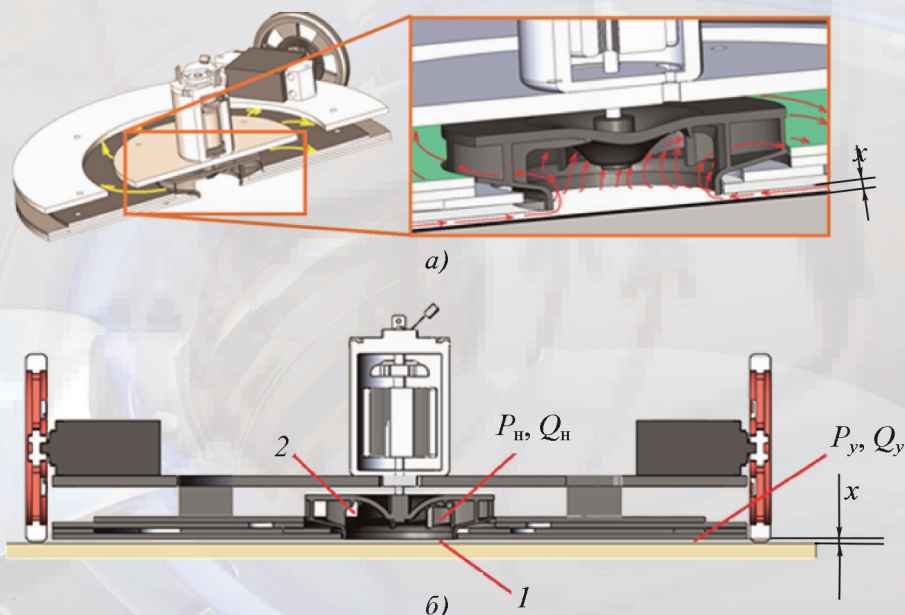


Рис. 1. Мобильный робот с аэродинамическим прижатием, работающий на основе центробежного насоса:
а – принцип работы; б – конструктивная схема

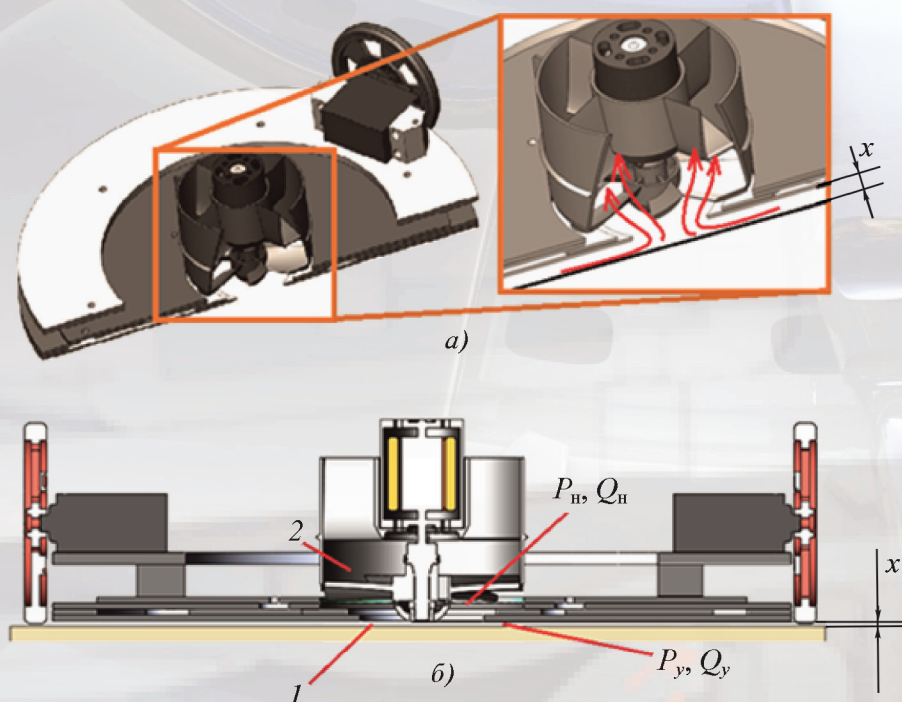


Рис.2. Мобильный робот с аэродинамическим прижатием, работающий на основе турбины:
а – принцип работы; б – конструктивная схема

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 18

2017

№ 7

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
SUBUDHI B., PhD, prof.
АЛИЕВ Т. А., акад. РАН, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН, проф.,
КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБЯЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., акад. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮЩЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс. н., с. н. с.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Челноков Ю. Н. Теория кинематического управления движением твердого тела . . . 435

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Градецкий В. Г., Князьков М. М., Кравчук Л. Н., Крюкова А. А., Семенов Е. А., Суханов А. Н., Чашухин В. Г. Управляемое формирование вакуума в устройствах сцепления с поверхностями при движении мобильных роботов с аэродинамическим прижимом . . . 447

Притыкин Ф. Н., Небритов В. И. Виртуальное управление движением руки андроида с использованием базы знаний при синтезе перемещений с учетом положения запретных зон . . . 452

Чернакова С. Э., Станкевич Л. А., Хлопин С. В., Нечаев А. И. Взаимодействие оператора и роботов при обучении показом и телеуправлении гетерогенными робототехническими системами на основе модели формы движения . . . 458

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Якушев А. С. Автономная система охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ. Часть I . . . 469

УПРАВЛЕНИЕ АВИАКОСМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Петрищев В. Ф. Энергосберегающий алгоритм управления переориентацией космического аппарата по зашумленным измерениям . . . 474

Фомичев А. В., Ли Е. К. Исследование точности аналитического решения задачи терминального наведения КА при посадке на поверхность Луны . . . 484

Шибанов Г. П. Оценка степени обученности оператора для управления летательным аппаратом . . . 492

Солдаткин В. М., Солдаткин В. В., Крылов Д. Л. Теоретические основы построения системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока . . . 495

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

ALIEV T. A., prof., Azerbaijan, Baku
 ANSHAKOV G. P., Russia, Samara
 BOLOTNIK N. N., Russia, Moscow
 CHENTSOV A. G., Russia, Ekaterinburg
 CHERNOUSKO F. L., Russia, Moscow
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 FEDOROV I. B., Russia, Moscow
 GROUMPOS P. P., prof., Greece, Patras
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 KALYAEV I. A., Russia, Taganrog
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria, Vienna
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus, Minsk
 KUZNETSOV N. A., Russia, Moscow
 LEONOV G. A., Russia, S.-Peterburg
 MATVEENKO A. M., Russia, Moscow
 MIKRIN E. A., Russia, Moscow
 PESHEKHONOV V. G., Russia, S.-Peterburg
 REZHIKOV A. F., Russia, Saratov
 SCHERBATYUK A. F., Russia, Vladivostok
 SEBRYAKOV G. G., Russia, Moscow
 SIGOV A. S., Russia, Moscow
 SOJFER V. A., Russia, Samara
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia, Moscow
 SOLOVJEV V. A., Russia, Moscow
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India, Sundargarh
 VASILYEV S. N., Russia, Moscow
 YUSUPOV R. M., Russia, S.-Peterburg
 ZHELTOV S. Yu., Russia, Moscow

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Russia, Moscow
 PUTOV V. V., Russia, S.-Peterburg
 YUSCHENKO A. S., Russia, Moscow

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu., Russia, Moscow

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Russia, Moscow
 ANTONOV B. I., Russia, Moscow
 ARSHANSKY M. M., Russia, Tver
 BUKOV V. N., Russia, Zhukovsky
 ERMOLOV I. L., Russia, Moscow
 FILARETOV V. F., Russia, Vladivostok
 FRADKOV A. L., Russia, S.-Peterburg
 FURSOV V. A., Russia, Samara
 GRADETSKY V. G., Russia, Moscow
 ILYASOV B. G., Russia, Ufa
 IVCHENKO V. D., Russia, Moscow
 KOLOSOV O. S., Russia, Moscow
 KOROSTELEV V. F., Russia, Vladimir
 LEBEDEV G. N., Russia, Moscow
 LOKHIN V. M., Russia, Moscow
 PAVLOVSKY V. E., Russia, Moscow
 PROKHOROV N. L., Russia, Moscow
 PSHIKHOPOV V. Kh., Russia, S.-Peterburg
 RAPOPORT E. Ya., Russia, Samara
 SERGEEV S. F., Russia, S.-Peterburg
 VITTIKH V. A., Russia, Samara
 YUREVICH E. I., Russia, S.-Peterburg

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E. V., Russia, Moscow

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

THEORY OF CONTROL OF MOVEMENT OF MECHANICAL SYSTEMS

Chelnokov Yu. N. Theory of Kinematic Motion Control of a Rigid Body. 435

ROBOTIC SYSTEMS

Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Kravchuk L. N., Kriukova A. A., Semenov E. A., Sukhanov A. N., Chashchukhin V. G. Vacuum Control in the Surface Attaching Devices of the Mobile Robots during their Movement under the Aerodynamic Attachment Force 447

Pritykin F. N., Nebritov V. I. Virtual Motion Control of an Android Robot Hand Using a Knowledge Base During Synthesis of Movements with Account of the Positions of the Exclusion Zones 452

Chernakova S. E., Stankevich L. A., Hlopina S. V., Nechaev A. I. Human — Robot Interaction During Learning and Telecontrol of the Heterogenic Robotic Systems Based on a Movement Shape Model 458

CONTROL OF PROCESS EQUIPMENT

Bobyry M. V., Kulabuhov S. A., Yakushev A. S. Autonomous Cooling System for a Cutting Tool in the Task of Operation of CNC Equipment. Part I 469

CONTROL AEROSPACE SYSTEMS

Petrishchev V. F. Power-Efficient Algorithm for the Spacecraft Reorientation Control by Noisy Measurements 474

Fomichev A. V., Li E. K. Accuracy Analysis of the Analytical Solution for the Lunar Lander Terminal Guidance Problem 484

Shibanov G. P. Evaluation of the Quality of Training of the Aircraft Operators 492

Soldatkin V. M., Soldatkin V. V., Krylov D. L. Theoretical Foundations for Construction the Air Data System for the Aircraft with a Stationary Included Receiver of Flow 495

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

Ю. Н. Челноков, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб., ChelnokovYuN@gmail.com,
Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

Теория кинематического управления движением твердого тела

Представлен обзор работ по теории кинематического управления вращательным движением твердого тела и пространственным движением свободного твердого тела. Теория основана на использовании кватернионных и бикватернионных кинематических моделей движения твердого тела. Также приводится обзор работ, посвященных построению оптимальных законов изменения вектора кинетического момента твердого тела, сообщение которого твердому телу обеспечивает его оптимальный перевод из произвольного начального углового положения в требуемое конечное угловое положение.

Ключевые слова: кинематическое управление, твердое тело, вращательное (угловое) движение, поступательное (траекторное) движение, кватернион, бикватернион

Введение

В механике материальной точки и твердого тела существуют геометрические задачи (включающие рассмотрение различных способов задания и описания геометрии положения и движения тела, различных способов перепроектирования векторов и винтов из одних систем координат в другие, а также теорию сложения конечных поворотов и перемещений твердого тела), кинематические и динамические задачи.

Аналогично, в теории управления движением материальной точки и твердого тела существуют геометрические задачи (к ним может быть отнесена, в частности, знаменитая задача о брахистохроне (И. Бернулли, 1696 г.), положившая начало вариационному исчислению, задачи построения с геометрических точек зрения требуемых (желаемых) траекторий движения), а также кинематические и динамические задачи управления движением.

В кинематических задачах управления движением твердого тела в качестве математических моделей движения тела рассматриваются кинематические уравнения вращательного (углового) и (или) поступательного (траекторного) движения тела, а в качестве управлений — векторы угловой и (или) поступательной скоростей тела или кинематические винты.

Цель кинематического управления — перевод твердого тела (или той или иной выбранной системы координат) из его (ее) заданного начального положения (углового положения в случае рассмотрения углового (вращательного) перемещения или углового и линейного положения в случае рассмотрения общего пространственного перемещения) в требуемое конечное положение за счет сообщения телу (выбранной системе координат) требуемой угловой скорости или требуемых угловой и линейной скоростей. Такая задача решается в классе задач

построения программных (в частности, оптимальных) траекторий движения и программных управлений движением твердого тела (выбранной системы координат).

Также целью кинематического управления может быть перевод твердого тела (или выбранной системы координат) из его (ее) заданного начального положения на любую выбранную программную траекторию углового (вращательного) или общего программного пространственного движения и дальнейшее асимптотически устойчивое движение по программной траектории с требуемой программной угловой скоростью в случае рассмотрения углового движения или с требуемыми программными угловой и линейной скоростями в случае рассмотрения общего пространственного движения за счет сообщения телу (выбранной системе координат) требуемой стабилизирующей угловой скорости или требуемых стабилизирующих угловой и линейной скоростей. Такая задача решается в классе задач построения стабилизирующих (в частности, оптимальных стабилизирующих) траекторий движения и управлений движением твердого тела (выбранной системы координат).

При решении кинематических задач управления движением твердого тела в качестве минимизируемых (оптимизируемых) функционалов используются следующие функционалы качества:

1) время управляемого движения тела (время перевода твердого тела из его начального положения в требуемое конечное положение), т.е. решаются задачи быстрогодействия;

2) интеграл от суммы квадратов проекций вектора угловой скорости твердого тела (т.е. интеграл от суммы квадратов управлений) в задаче оптимального программного разворота твердого тела из заданного начального углового положения тела в требуемое конечное угловое положение при заданном или фиксированном времени разворота, которое определяется в ходе решения задачи оптимизации;

3) интеграл от суммы квадратов проекций угловой и линейной скоростей свободного твердого тела или интеграл от

суммы квадратов дуальных ортогональных проекций кинематического винта свободного твердого тела (т.е. интеграл от суммы квадратов вещественных или дуальных управлений) в задаче оптимального программного перемещения свободного твердого тела из заданного начального углового и линейного положения в требуемое конечное положение при заданном или фиксированном времени перемещения, которое определяется в ходе решения задачи оптимизации;

4) интеграл от взвешенной суммы квадратов компонент кинематического стабилизирующего винта скоростей (компонент дуального стабилизирующего управления) и суммы квадратичных отклонений параметров движения свободного твердого тела от их программных значений за бесконечное время управления (задача Н-бесконечность оптимизации) в кинематической задаче оптимальной нелинейной стабилизации произвольного программного движения свободного твердого тела;

5) интеграл от модуля вектора программной или стабилизирующей угловой скорости твердого тела (т.е. интеграл от модуля вектора программного или стабилизирующего управления) в задаче оптимального программного или стабилизирующего управления угловым движением твердого тела;

6) интеграл от модуля программного или стабилизирующего кинематического винта свободного твердого тела (т.е. интеграл от модуля программного или стабилизирующего винта управления) в задачах оптимального программного или стабилизирующего управления движением свободного твердого тела.

Кинематические задачи быстрогодействия имеют ясный физический смысл. Использование в качестве минимизируемых функционалов качества интеграла от суммы квадратов проекций вектора угловой скорости твердого тела и интеграла от суммы квадратов дуальных ортогональных проекций кинематического винта свободного твердого тела является естественным, так как в теории управления наиболее часто используются интегральные квадратичные функционалы качества, содержащие под знаком минимизируемого интеграла суммы квадратов управлений, а в кинематических задачах управления роль управлений играют компоненты векторов угловой и линейной скоростей твердого тела или компоненты кинематического винта свободного твердого тела.

Подчеркнем, что используемые интегральные функционалы качества имеют ясный физический смысл, поскольку управлениями в кинематических задачах управления являются основные кинематические величины (фундаментальные физические величины) — векторы угловой и линейной скоростей или кинематический винт твердого тела. Отметим также, что минимизация интегрального квадратичного функционала качества (интеграла от суммы квадратов проекций векторов угловой и линейной скоростей твердого тела или интеграла от суммы квадратов дуальных ортогональных проекций кинематического винта свободного твердого тела) имеет и другой ясный физический смысл: фактически минимизируются затраты кинетической энергии твердого тела на управление движением тела.

Кинематические задачи управления играют важную роль в теории управления движением твердого тела в силу следующих причин. Во-первых, они, в отличие от динамических задач управления, во

многих случаях имеют аналитические решения, которые часто используются при построении программных траекторий и управлений движением твердого тела или движущегося объекта, рассматриваемого как твердое тело. Во-вторых, использование аналитических решений кинематических задач управления в сочетании с методом решения обратных задач динамики позволяет в ряде случаев построить эффективные законы управления движением твердого тела, учитывающие его динамику.

Отметим также, что задачи управления в кинематической постановке рассматриваются в теории дифференциальных игр, бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС), в механике космического полета, механике роботов-манипуляторов, при решении задач наведения, анимации (оживления) пространственных образов на экранах ЭВМ и в других прикладных задачах.

В данной статье дается обзор работ по теории кинематического управления вращательным (угловым) движением твердого тела и управления пространственным движением свободного твердого тела, использующей кватернионы Гамильтона и параболические бикватернионы Клиффорда для описания движения. В основе теории лежит использование кватернионных и бикватернионных кинематических моделей движения твердого тела. Также приводится обзор работ, посвященных задачам построения оптимальных законов изменения вектора кинетического момента динамически симметричного твердого тела и твердого тела с произвольным распределением масс, сообщение которого твердому телу обеспечивает его оптимальный перевод из произвольного начального углового положения в требуемое конечное угловое положение. Эти задачи занимают промежуточное положение между кинематическими и динамическими задачами управления вращательным движением твердого тела и играют важную роль в теории управления ориентацией космических аппаратов с помощью вращающихся маховиков.

Теория кинематического управления движением твердого тела имеет следующие актуальные приложения в механике космического полета, инерциальной навигации, механике роботов-манипуляторов: двухконтурное управление вращательным движением твердого тела (космического аппарата) с использованием БИНС; бесплатформенные корректируемые системы ориентации и навигации движущихся объектов; оптимальная переориентация орбиты, плоскости орбиты и коррекция угловых элементов орбиты космического аппарата посредством реактивного ускорения, ортогонального плоскости орбиты аппарата; управление движением платформенного комплекса "ТСП-Аргус" космического проекта "Марс-94"; решение обратных задач кинематики роботов-манипуляторов с использованием бикватернионной теории кинематического управления, кинематическое управление в механике роботов-манипуляторов (независимое программное управление движением по скорости).

1. Кинематические задачи управления вращательным движением твердого тела

В кватернионной постановке кинематические задачи управления вращательным движением твердого тела впервые рассматривались В. Н. Бранцем и И. П. Шмыглевским [1—3, 1972, 1973], а затем П. К. Плотниковым, А. Н. Сергеевым и Ю. Н. Челноковым [4, 1991], В. Н. Бранцем и И. П. Шмыглевским [5, 1992], А. А. Панковым и Ю. Н. Челноковым [6, 1995], А. В. Молоденковым [7, 1995], В. Г. Бирюковым и Ю. Н. Челноковым [8, 2002], В. В. Маланиным и Н. А. Стрелковой [9, 2004], Ю. Н. Челноковым [10, 2006; 11, 2011].

В работах [3, 9] изучалась задача кинематического оптимального (в смысле быстродействия) пространственного разворота твердого тела (задача построения кватерниона оптимальной программной ориентации тела и его оптимальной программной угловой скорости). В этой задаче (а также в других кинематических задачах управления вращательным движением твердого тела) роль управления играет вектор угловой скорости твердого тела. Фазовой переменной является нормированный кватернион ориентации твердого тела, на него накладываются граничные условия. Математическая модель движения имеет вид классического кватернионного кинематического уравнения вращательного (углового) движения твердого тела [3, 5, 10]:

$$\begin{aligned} 2\dot{\lambda} &= \lambda \circ \omega_X, \\ \lambda &= \lambda_0 + \lambda_1 i_1 + \lambda_2 i_2 + \lambda_3 i_3, \\ \dot{\lambda} &= \dot{\lambda}_0 + \dot{\lambda}_1 i_1 + \dot{\lambda}_2 i_2 + \dot{\lambda}_3 i_3, \\ \omega_X &= \omega_1 i_1 + \omega_2 i_2 + \omega_3 i_3. \end{aligned} \quad (1)$$

В этом уравнении фазовой переменной служит классический кватернион поворота Гамильтона λ , характеризующий ориентацию твердого тела в опорной системе координат ξ (норма этого кватерниона равна единице), компоненты λ_j ($j = 0, 1, 2, 3$) кватерниона λ являются параметрами Родрига—Гамильтона (Эйлера); управлением является кватернион ω_X с нулевой скалярной частью, его компоненты ω_i — проекции вектора ω угловой скорости вращения твердого тела относительно опорной системы координат ξ на оси связанной с твердым телом системы координат X (кватернион ω_X называется отображением вектора угловой скорости на связанный базис X); i_1, i_2, i_3 — векторные мнимые единицы Гамильтона; $\circ$ — символ кватернионного произведения, верхняя точка означает производную по времени t , дифференцирование выполняется в предположении неизменности величин i_1, i_2, i_3 .

Кватернионное уравнение (1) эквивалентно векторным уравнениям

$$\begin{aligned} 2\dot{\lambda}_0 &= -\lambda_v \cdot \omega_X, \quad 2\dot{\lambda}_v = \lambda_0 \omega_X + \lambda_v \times \omega_X; \\ \lambda_v &= \lambda_1 i_1 + \lambda_2 i_2 + \lambda_3 i_3, \end{aligned}$$

где центральная точка — символ скалярного произведения векторов, $\times$ — символ векторного произведения; λ_v — векторная часть кватернион λ .

Кватернионное уравнение (1) также эквивалентно четырем скалярным дифференциальным уравнениям

$$\begin{aligned} 2\dot{\lambda}_0 &= -\omega_1 \lambda_1 - \omega_2 \lambda_2 - \omega_3 \lambda_3, \\ 2\dot{\lambda}_1 &= \omega_1 \lambda_0 + \omega_3 \lambda_2 - \omega_2 \lambda_3, \\ 2\dot{\lambda}_2 &= \omega_2 \lambda_0 - \omega_3 \lambda_1 + \omega_1 \lambda_3, \\ 2\dot{\lambda}_3 &= \omega_3 \lambda_0 + \omega_2 \lambda_1 - \omega_1 \lambda_2. \end{aligned}$$

Задача кинематического оптимального пространственного разворота твердого тела для интегрального квадратичного (в отношении проекций вектора абсолютной угловой скорости твердого тела) функционала качества изучалась в работе [7].

В работах [1—6] рассматривались кинематические задачи управления ориентацией твердого тела в рамках теории нелинейной стабилизации с использованием кватернионных кинематических уравнений возмущенного углового движения твердого тела (уравнений в отклонениях) и управления (вектора угловой скорости тела), построенного по принципу нелинейной обратной связи, реализующей асимптотически устойчивую позиционную, или интегральную, или интегрально-позиционную коррекцию углового положения тела. Используемые кватернионные кинематические уравнения возмущенного углового движения твердого тела в нормированных кватернионах ориентации имеют вид [3, 4, 10]:

$$\begin{aligned} 2\dot{\mu} &= \lambda \circ \omega_{KX} \circ \bar{\lambda}^0(t) = \\ &= \mu \circ \lambda^0(t) \circ \omega_{KX} \circ \bar{\lambda}^0(t) = \omega_{K\xi} \circ \mu \end{aligned} \quad (2)$$

или

$$2\dot{\mu}^* = \mu^* \circ \omega_{KX} + \mu^* \circ \omega_Z^0(t) - \omega_Z^0(t) \circ \mu^*. \quad (3)$$

Здесь, по-прежнему, λ — кватернион поворота, характеризующий ориентацию твердого тела в опорной системе координат ξ ; $\lambda^0(t)$ и $\omega_Z^0(t)$ — кватернионы, характеризующие программную ориентацию и программную угловую скорость вращения тела в опорной системе координат ξ (известные функции времени), кватернион ω_Z^0 определен своими компонентами в программной системе координат Z ; μ и μ^* — кватернионы ориентации твердого тела в программной системе координат Z , определенные своими компонентами в системах координат ξ и X соответственно (кватернионы расогласования (ошибки ориентации тела)); ω_{KX} и $\omega_{K\xi}$ — кватернионы угловой скорости коррекции углового движения тела (управления, определенные в системах координат X и ξ соответственно); верхняя черта означает сопряженный кватернион.

Кватернион расогласования μ может быть определен своими компонентами либо в опорном ба-

зисе ξ , либо в связанном базисе X (а следовательно, и в программном базисе Z). В первом случае

$$\lambda = \mu \circ \lambda^0, \mu = \lambda \circ \bar{\lambda}^0;$$

во втором случае

$$\lambda = \lambda^0 \circ \mu^*, \mu^* = \bar{\lambda}^0 \circ \lambda.$$

Видно, что если в уравнение ошибок (2) входит (при задании угловой скорости коррекции в связанном базисе) кватернион $\lambda^0 = \lambda^0(t)$, характеризующий программную ориентацию твердого тела, то в уравнение ошибок (3) входит программное управление $\omega_Z^0(t)$ (угловая скорость программного вращения твердого тела).

В статье [4] (см. также работу [10]) рассмотрена в кватернионной кинематической постановке поставленная в работе [3] задача приведения связанной с твердым телом системы координат к опорной системе координат, вращающейся с заданной (программной) абсолютной угловой скоростью. В качестве исходных использованы кинематические уравнения углового движения твердого тела в ненормированных кватернионах, предложенные в работе [3]. Для построения корректирующего управления использованы кинематические уравнения возмущенного углового движения твердого тела в ненормированных кватернионах, а в качестве управлений — проекции абсолютной угловой скорости вращения тела на связанные с ним оси (в математической постановке задачи и в ее решении использован кватернион угловой скорости с ненулевой компонентой, т.е. не трехмерное кинематическое управление, а четырехмерное управление).

В этой статье предложены два вида коррекции (стабилизации), являющиеся кватернионными аналогами позиционной и интегральной коррекций, и композиция позиционной и интегральной коррекций. Показано, что для предлагаемых видов коррекции получаются линейные (без линеаризации) дифференциальные уравнения ошибок системы управления ориентацией и уравнения движения замкнутой системы управления. Установлено, что полученное кватернионное уравнение ошибок для кватерниона рассогласования, определенного своими компонентами в инерциальном базисе, не только линейно, но и стационарно и инвариантно относительно любого выбранного программного движения опорного базиса. Построено общее решение уравнений замкнутой системы управления движением, установлены условия асимптотической устойчивости программного движения, приведено одно из возможных решений задачи синтеза оптимальных значений коэффициентов коррекции.

В книге [5] рассмотрены различные аспекты кинематической задачи приведения связанного с твердым телом координатного базиса к опорному базису, называемому приборным базисом: общие законы кинематического управления, обеспечивающие приведение связанного базиса к неподвижному

или подвижному приборному базису, и устойчивость процесса приведения. При этом рассмотрены как нелинейные законы управления, использующие информацию о компонентах кватерниона ориентации связанного базиса (точнее, информацию о скалярной и векторной частях кватерниона ориентации), так и нелинейные законы управления, использующие указанную информацию, а также интегральную информацию (интеграл от произведения некоторой скалярной функции, зависящей от скалярной части кватерниона ориентации связанного базиса, и некоторой векторной функции, зависящей от векторной части кватерниона ориентации связанного базиса). Последние законы управления названы интегральными.

В книге [5] также подробно рассмотрена задача коррекции приборного базиса по сигналам датчиков углового положения, когда прямая информация о взаимном положении связанного и приборного базисов отсутствует.

В работах [8, 10] кинематическая задача управления ориентацией твердого тела решалась в рамках теории оптимальной нелинейной стабилизации.

Подчеркнем, что использование кватернионных кинематических уравнений углового движения твердого тела позволило построить аналитические решения всех указанных кинематических задач управления вращательным движением твердого тела в нелинейных постановках.

2. Кинематические задачи управления пространственным движением свободного твердого тела

2.1. Бикватернионное кинематическое уравнение движения свободного твердого тела и кинематическая задача быстрогодействия. Как известно, произвольное пространственное перемещение свободного твердого тела эквивалентно винтовому перемещению (теорема Шаля). Поэтому мгновенное пространственное движение свободного твердого тела представляет собой мгновенное винтовое движение. Кинематическая задача построения оптимального в смысле быстрогодействия винтового перемещения свободного твердого тела из заданного начального положения в требуемое конечное в бикватернионной постановке изучалась Н. А. Стрелковой [12, 1982], В. В. Маланиным и Н. А. Стрелковой [9, 2004]. Для получения аналитического решения задачи было использовано бикватернионное кинематическое уравнение винтового движения свободного твердого тела, предложенное Ю. Н. Челноковым [13, 1980; 14, 1981] и имеющее вид

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \mathbf{U}_X, \quad (4)$$

$$\Lambda = \Lambda_0 + \Lambda_1 \mathbf{i}_1 + \Lambda_2 \mathbf{i}_2 + \Lambda_3 \mathbf{i}_3, \mathbf{U}_X = U_1 \mathbf{i}_1 + U_2 \mathbf{i}_2 + U_3 \mathbf{i}_3,$$

$$\dot{\Lambda} = \dot{\Lambda}_0 + \dot{\Lambda}_1 \mathbf{i}_1 + \dot{\Lambda}_2 \mathbf{i}_2 + \dot{\Lambda}_3 \mathbf{i}_3.$$

Здесь бикватернионная переменная $\Lambda = \lambda + s\lambda^0$, имеющая дуальные компоненты $\Lambda_j = \lambda_j + s\lambda_j^0$

($j = 0, 1, 2, 3$), описывает собой движение свободного твердого тела (т.е. винтовое движение связанной с телом системы координат X) относительно опорной системы координат ξ ; λ и λ^0 — кватернионы Гамильтона, описывающие угловое (вращательное) и поступательное (траекторное) движение твердого тела в системе координат ξ ; бикватернионный коэффициент $U_X = \omega_X + s\mathbf{v}_X$, имеющий дуальные компоненты $U_i = \omega_i + sv_i$ ($i = 1, 2, 3$), — отображение мгновенного винта скоростей $U = \omega + s\mathbf{v}$ твердого тела на оси связанной системы координат X (ω и $\mathbf{v}$ — векторы мгновенной угловой и линейной скоростей твердого тела, ω_i и v_i — проекции этих векторов на оси системы координат X); s — комплексность Клиффорда, обладающая свойством $s^2 = 0$.

Отметим, что бикватернионная переменная Λ является параболическим бикватернионом Клиффорда, ее дуальные компоненты $\Lambda_j = \lambda_j + s\lambda_j^0$ ($j = 0, 1, 2, 3$) являются дуальными параметрами Родрига—Гамильтона (Эйлера), компоненты $U_i = \omega_i + sv_i$ ($i = 1, 2, 3$) бикватерниона $U_X = \omega_X + s\mathbf{v}_X$ являются в кинематической задаче управления пространственным движением свободного твердого тела дуальными управлениями и представляют собой композиции вещественных управлений ω_i и v_i ($i = 1, 2, 3$).

Отметим также, что проекции x_i и ξ_i радиуса-вектора $\mathbf{r}$, проводимого из начала опорной системы координат ξ в начало связанной системы координат X , на оси систем координат X и ξ соответственно связаны с параметрами λ_j , λ_j^0 винтового движения тела кватернионными соотношениями [13, 14, 10]

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_X &= x_1\mathbf{i}_1 + x_2\mathbf{i}_2 + x_3\mathbf{i}_3 = 2\bar{\lambda} \circ \lambda^0; \\ \mathbf{r}_\xi &= \xi_1\mathbf{i}_1 + \xi_2\mathbf{i}_2 + \xi_3\mathbf{i}_3 = 2\lambda^0 \circ \bar{\lambda}; \\ \lambda &= \lambda_0 + \lambda_1\mathbf{i}_1 + \lambda_2\mathbf{i}_2 + \lambda_3\mathbf{i}_3; \\ \lambda^0 &= \lambda_0^0 + \lambda_1^0\mathbf{i}_1 + \lambda_2^0\mathbf{i}_2 + \lambda_3^0\mathbf{i}_3.\end{aligned}$$

В них величины x_i и ξ_i характеризуют местоположение тела в опорной системе координат ξ (ξ_i — декартовы координаты тела в этой системе координат).

Бикватернионное уравнение (4) эквивалентно двум кватернионным дифференциальным уравнениям

$$\begin{aligned}2\dot{\lambda} &= \lambda \circ \omega_X, \quad 2\dot{\lambda}^0 = \lambda^0 \circ \omega_X + \lambda \circ \mathbf{v}_X; \\ \dot{\lambda} &= \dot{\lambda}_0 + \dot{\lambda}_1\mathbf{i}_1 + \dot{\lambda}_2\mathbf{i}_2 + \dot{\lambda}_3\mathbf{i}_3; \\ \dot{\lambda}^0 &= \dot{\lambda}_0^0 + \dot{\lambda}_1^0\mathbf{i}_1 + \dot{\lambda}_2^0\mathbf{i}_2 + \dot{\lambda}_3^0\mathbf{i}_3; \\ \omega_X &= \omega_1\mathbf{i}_1 + \omega_2\mathbf{i}_2 + \omega_3\mathbf{i}_3, \quad \mathbf{v}_X = v_1\mathbf{i}_1 + v_2\mathbf{i}_2 + v_3\mathbf{i}_3,\end{aligned}$$

в которых λ и λ^0 (с точки зрения теории управления) — кватернионные фазовые переменные, а ω_X и $\mathbf{v}_X$ — кватернионные управления.

Использование бикватернионного уравнения (4) в теории кинематического управления движением

свободного твердого тела позволяет применить мощный принцип перенесения Котельникова—Штуди [10], в соответствии с которым все результаты, полученные в задачах кинематического управления вращательным движением твердого тела с использованием кватернионного кинематического уравнения (1), могут быть формально перенесены на более общие задачи кинематического управления движением свободного твердого тела, если в кватернионных уравнениях и соотношениях, полученных при решении задач управления вращательным движением, кватернионные величины заменить на соответствующие бикватернионные величины, используемые в задачах кинематического управления движением свободного твердого тела.

2.2. Кинематическое бикватернионное логарифмическое управление движением свободного твердого тела по принципу обратной связи. Кинематическое управление движением свободного твердого тела рассматривалось с использованием дуальных кватернионов (параболических бикватернионов) Dapeng Han, Qing Wei и Zexiang Li [15, 2008]. В этой работе используется понятие логарифма кватерниона, введенное М. J. Kim, М. S. Kim и S. Y. Shin [16, 1996]: логарифм кватерниона — это трехмерный вектор, равный половинному эйлерову углу поворота, умноженному на единичный вектор эйлеровой оси конечного поворота твердого тела (т.е. это половинный классический эйлеров вектор конечного поворота твердого тела).

Отметим, что такое логарифмическое представление кватерниона поворота известно в отечественной литературе. Так, в книге Ю. Н. Челнокова [10, 2006] показывается, что четырехмерная ортогональная кватернионная матрица поворота равна матричной экспоненте от трехмерной кососимметрической матрицы, элементы которой — проекции половинного эйлерова вектора конечного поворота, а классический кватернион поворота Гамильтона равен кватернионной экспоненте от половинного эйлерова вектора конечного поворота. Отсюда непосредственно следует, что логарифм кватерниона равен половинному эйлерову вектору конечного поворота. В статье [15, 2008] приводится также логарифмическое представление дуального кватерниона (параболического бикватерниона) перемещения твердого тела в виде половинного винта конечного перемещения, соответствующего описанию Шала винтового конечного перемещения свободного твердого тела. Введенное логарифмическое представление дуального кватерниона используется Dapeng Han, Qing Wei и Zexiang Li для построения кинематического логарифмического закона управления движением свободного твердого тела по принципу обратной связи.

В статье Dapeng Han, Qing Wei и Zexiang Li [15, 2008] вводится (формулы (8), (9) статьи) как известное (без приведения ссылок или вывода) дуальное (бикватернионное) кинематическое урав-

нение движения свободного твердого тела в форме, использующей (в наших терминах) отображение кинематического винта твердого тела на "неподвижный" (опорный) базис. Отметим, что это уравнение было получено ранее Ю. Н. Челноковым [14, 1981] (см. также бикватернионные кинематические уравнения (6.29), (6.15) книги Ю. Н. Челнокова [10, 2006] и уравнение (3.64) книги В. Н. Бранца и И. П. Шмыглевского [5, 1992]). В статье Ю. Н. Челнокова [14, 1981] и в его книге [10, 2006] отмечается, что дуальные ортогональные проекции кинематического винта твердого тела на оси "неподвижной" (опорной) системы координат, входящие в обсуждаемое бикватернионное кинематическое уравнение, содержат не только проекции векторов угловой и линейной скоростей тела (точнее, линейной скорости точки тела, выбранной в качестве полюса) на оси опорной системы координат, но и проекции радиус-вектора выбранного полюса тела на опорные координатные оси. Это затрудняет использование такой бикватернионной формы кинематических уравнений движения свободного твердого тела (в силу их сложности). Указанного недостатка не имеет другая форма бикватернионного кинематического уравнения движения свободного твердого тела (4), также предложенная Ю. Н. Челноковым [13, 1980; 14, 1981]. В ней в качестве коэффициентов бикватернионного уравнения выступают только дуальные ортогональные проекции кинематического винта твердого тела на оси системы координат, связанной с телом, представляющие собой комплексные (в смысле Клиффорда) композиции проекций векторов угловой и линейной скоростей тела на связанные с ним координатные оси. Именно такое бикватернионное кинематическое уравнение движения свободного твердого тела было использовано Н. А. Стрелковой и В. В. Маланиным [12, 1982; 9, 2004] при решении кинематической задачи оптимального в смысле быстродействия винтового перемещения свободного твердого тела из заданного начального положения в требуемое конечное положение. В случае, когда необходимо знание проекций найденного оптимального винта скоростей твердого тела не на связанные с телом координатные оси, а на оси "неподвижной" (опорной) системы координат (как, например, в задачах робототехники), необходимо воспользоваться операцией перепроектирования дуальных ортогональных проекций кинематического винта из связанной системы координат в опорную.

В статье Dapeng Han, Qing Wei и Zexiang Li [15, 2008] предложен кинематический бикватернионный стабилизирующий закон управления движением свободного твердого тела, имеющий вид логарифмической обратной связи. Кинематический винт свободного твердого тела, определенный своими дуальными ортогональными проекциями в "неподвижной" (основной) системе координат, предлагается формировать по принципу отрицательной обратной связи в виде логарифма дуаль-

ного кватерниона, характеризующего положение тела в пространстве, умноженного на отрицательный коэффициент пропорциональности (коэффициент усиления обратной связи). С помощью функций Ляпунова доказывается, что такое управление гарантирует стабилизацию (асимптотическую устойчивость) любого первоначального положения твердого тела. В статье также приводится бикватернионное логарифмическое стабилизирующее управление программным (рекомендованным) движением при наличии программного и стабилизирующего управлений, предназначенное для вывода тела на рекомендованную траекторию из произвольного начального положения и отслеживания рекомендованной траектории движения тела, а также приводятся примеры управления плоским движением твердого тела (омниробота). Отметим, однако, что в статье нет строгой постановки задач кинематического управления движением твердого тела и нет рекомендаций по выбору коэффициентов усиления предлагаемых логарифмических отрицательных обратных связей, обоснованный выбор которых осложняется нелинейностью дифференциальных уравнений движения свободного твердого тела, замкнутых законами управления, построенными в виде логарифмической обратной связи.

Работы тех же авторов Dapeng Han, Qing Wei, Zexiang Li, Weimeng Sun [17, 2008] и Dapeng Han, Qing Wei, Zexiang Li [18, 2008] также посвящены решению кинематических задач управления движением механических систем и свободного твердого тела с использованием дуальных кватернионов и законов управления, построенных с использованием отрицательной бикватернионной логарифмической обратной связи.

В недавней работе E. Ozgur, Y. Mezouar [19, 2016] рассмотрено управление движением руки робота с использованием дуальных кватернионов и кинематического бикватернионного стабилизирующего закона управления, предложенного Dapeng Han, Qing Wei, Zexiang Li [15, 2008] и имеющего вид отрицательной бикватернионной логарифмической обратной связи.

2.3. Построение стабилизирующих бикватернионных законов управления движением свободного твердого тела. В работе Ю. Н. Челнокова [20, 2013] рассматривается задача построения с использованием принципа обратной связи кинематического винта скоростей, сообщение которого свободному твердому телу обеспечивает его асимптотически устойчивый перевод из произвольного начального положения на любую выбранную программную траекторию винтового движения и дальнейшее асимптотически устойчивое движение по этой траектории с заданным (программным) кинематическим винтом скоростей. Изучаемая в работе [20] задача относится к классу кинематических задач управления движением твердого тела и является обобщением исследованной в работах [4, 6, 10] за-

дачи построения вектора угловой скорости, обеспечение которого твердому телу обеспечивает его асимптотически устойчивый перевод из произвольного начального углового положения на произвольно выбранную программную траекторию углового движения и дальнейшее асимптотически устойчивое движение по этой траектории с заданной (программной) угловой скоростью. В изучаемой кинематической задаче управления движением свободного твердого тела роль управления играет кинематический винт твердого тела, фазовой переменной является нормированный или ненормированный бикватернион конечного перемещения твердого тела, исходная математическая модель движения имеет вид бикватернионного кинематического уравнения движения свободного твердого тела (4) [13, 1980; 14, 1981].

В статье [20] приводится решение задачи в двух постановках: с использованием бикватернионных кинематических уравнений движения в нормированных и ненормированных бикватернионных переменных. При этом в первом случае в качестве управления выступает трехмерный винт управления (точнее, бикватернион кинематического винта с нулевой скалярной частью), а во втором — четырехмерный бикватернион управления с ненулевой дуальной скалярной частью, которая отвечает за изменение нормы бикватерниона конечного перемещения твердого тела (точнее, отвечает за управление нормой этого бикватерниона). Показывается, что использование ненормированных бикватернионных переменных позволяет построить регулярные законы управления, не содержащие особых точек, в то время как использование нормированных бикватернионных переменных приводит к законам управления, содержащим особые точки, в которых эйлеров угол поворота тела равен π или 2π радиан.

Основное внимание в работе [20] уделяется задаче построения стабилизирующего (корректирующего) управления. Стабилизирующее управление формируется по принципу обратной связи в виде нелинейной бикватернионной функции компонент бикватерниона ошибки по местоположению твердого тела (угловому и линейному) так, чтобы нелинейные нестационарные дифференциальные уравнения возмущенного движения свободного твердого тела, замкнутые построенными законами управления, принимали эталонный вид, инвариантный относительно любого выбранного программного движения — вид дуальных линейных стационарных дифференциальных уравнений первого или второго порядка относительно бикватернионной переменной, характеризующей конечную ошибку по местоположению твердого тела. Постоянные коэффициенты (скалярные, матричные, бикватернионные) этих (эталонных) уравнений имеют смысл коэффициентов усиления нелинейных обратных связей по местоположению тела, реализуемых системой управления движением твердого тела, а сами

уравнения описывают эталонную динамику переходных процессов. Это позволяет аналитически точно определять коэффициенты усиления нелинейных обратных связей исходя из желаемых качественных и количественных характеристик переходного процесса.

Центральную роль в теории, построенной в работе [20], играют нелинейные нестационарные дифференциальные уравнения возмущенного движения свободного твердого тела в нормированных и ненормированных бикватернионных переменных. Использование бикватернионов конечных перемещений позволяет получить компактные и наглядные уравнения возмущенного движения твердого тела, удобные для построения асимптотически устойчивых в большом или в целом управлений движением твердого тела. В работе [20] рассматриваются два бикватернионных способа описания ошибки по местоположению твердого тела: с помощью бикватерниона ошибки положения, определенного своими компонентами в основной (опорной) системе координат, и с помощью бикватерниона ошибки положения, определенного своими компонентами в связанной с твердым телом системе координат (с помощью собственного бикватерниона ошибки положения). Кроме этого, рассматриваются два способа формирования полного управления: 1) винтовой, когда это управление формируется в виде винтовой суммы стабилизирующего и программного управлений (кинематических винтов); 2) формальный, когда дуальные ортогональные проекции полного управления на оси связанной системы координат формируются в виде суммы дуальных ортогональных проекций программного и стабилизирующего управлений (кинематических винтов) на оси программной и связанной систем координат соответственно (т.е. на оси разных систем координат). Полученные с помощью этих способов дифференциальные уравнения возмущенного движения различаются как по форме, так и по смыслу используемых переменных, что приводит к разным законам формирования управления.

Две использованные в работе [20] компактные формы дифференциальных уравнений возмущенного движения свободного твердого тела в нормированных бикватернионных переменных, построенные в строгой нелинейной постановке, имеют, соответственно, вид

$$2\dot{\mathbf{M}} = \delta \mathbf{U}_{\xi} \circ \mathbf{M}, \quad (5)$$

$$2\dot{\mathbf{M}}^* = \mathbf{M}^* \circ \Delta \mathbf{U}_X. \quad (6)$$

Здесь $\mathbf{M}$ — бикватернион ошибки местоположения свободного твердого тела (бикватернион расогласования, характеризующий отклонение действительного положения (углового и линейного) связанной с твердым телом системы координат X от ее требуемого программного положения Z), определенный своими компонентами $M_j = \mu_j + s\mu_j^0$

($j = 0, 1, 2, 3$) в опорной (основной) системе координат ξ ; $\mathbf{M}^*$ — собственный бикватернион ошибки местоположения твердого тела, определенный своими компонентами $M_j^* = \mu_j^* + s\mu_j^{0*}$ ($j = 0, 1, 2, 3$) в связанном базисе X ; $\delta\mathbf{U}_\xi$ и $\Delta\mathbf{U}_X$ — бикватернионные стабилизирующие управления, определенные своими дуальными компонентами δU_{ξ_i} и ΔU_i ($i = 1, 2, 3$) в опорной и связанной системах координат соответственно.

Полное управление $\mathbf{U}$ (мгновенный винт скоростей свободного твердого тела) складывается из программного $\mathbf{U}^{\text{pr}}(t)$ и стабилизирующего $\delta\mathbf{U}$ управлений и формируется с помощью бикватернионных формул

$$\begin{aligned}\mathbf{U}_X &= \mathbf{U}_Z^{\text{pr}}(t) + \delta\mathbf{U}_X = (U_1^{\text{pr}}(t) + \delta U_1)\mathbf{i}_1 + \\ &+ (U_2^{\text{pr}}(t) + \delta U_2)\mathbf{i}_2 + (U_3^{\text{pr}}(t) + \delta U_3)\mathbf{i}_3, \\ \delta\mathbf{U}_X &= \bar{\Lambda} \circ \delta\mathbf{U}_\xi \circ \Lambda, \Lambda = \mathbf{M} \circ \mathbf{N}(t),\end{aligned}\quad (7)$$

или

$$\begin{aligned}\mathbf{U}_X &= \mathbf{U}_X^{\text{pr}} + \Delta\mathbf{U}_X = \bar{\mathbf{M}}^* \circ \mathbf{U}_Z^{\text{pr}}(t) \circ \mathbf{M}^* + \Delta\mathbf{U}_X = \\ &= \bar{\mathbf{M}}^* \circ (U_1^{\text{pr}}(t)\mathbf{i}_1 + U_2^{\text{pr}}(t)\mathbf{i}_2 + U_3^{\text{pr}}(t)\mathbf{i}_3) \circ \mathbf{M}^* + \\ &+ \Delta U_1\mathbf{i}_1 + \Delta U_2\mathbf{i}_2 + \Delta U_3\mathbf{i}_3.\end{aligned}\quad (8)$$

Здесь $\mathbf{U}_X$ — отображение мгновенного винта скоростей твердого тела $\mathbf{U}$ (полного управления) на связанный базис X ; $\mathbf{U}_Z^{\text{pr}}(t)$ — отображение программного винта скоростей тела на оси программной системы координат Z (программное управление), являющееся известной функцией времени t ; $\mathbf{N}(t)$ — бикватернион, характеризующий программное движение свободного твердого тела (известная функция времени); верхняя черта означает сопряженный бикватернион.

Для решения кинематической задачи стабилизирующего управления движением свободного твердого тела с использованием ненормированных бикватернионов в работе [20] в качестве исходного уравнения движения тела использовано бикватернионное кинематическое уравнение

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ (U_0 + \mathbf{U}_X), \mathbf{U}_X = U_1\mathbf{i}_1 + U_2\mathbf{i}_2 + U_3\mathbf{i}_3,$$

где, по-прежнему, $U_i = \omega_i + s\nu_i$ ($i = 1, 2, 3$) — полные дуальные управления, а $U_0 = \omega_0 + s\nu_0$ — произвольная дуальная функция, связанная с нормой $\|\Lambda\|$ бикватерниона Λ дифференциальными соотношениями

$$\frac{d}{dt}(\|\Lambda\|) = U_0\|\Lambda\|, U_0 = \frac{d}{dt}(\ln\|\Lambda\|).$$

Величина U_0 рассматривается в качестве четвертого дуального управления и отвечает за изменение нормы бикватерниона Λ в процессе управляемого движения твердого тела. Полное управление $\mathbf{U}$ формируется в соответствии с соотношениями (7) или (8), в которых сопряженные бикватернионы заменяются на обратные.

На основе бикватернионных дифференциальных уравнений возмущенного движения в нормированных и ненормированных бикватернионах в работе [20] построены две группы законов управления, использующих различные кинематические параметры движения твердого тела: винтовые части нормированных бикватернионов перемещений и ненормированные бикватернионы перемещений. Использование нормированных бикватернионов перемещений в теории и практике управления движением твердого тела и роботов-манипуляторов стало достаточно распространенным, поскольку они являются наиболее компактным и удобным средством математического описания винтового движения твердого тела (движения свободного твердого тела). Использование (при синтезе второй группы законов управления) ненормированных бикватернионов перемещений приводит к необходимости введения расширенного (четырёхмерного) бикватерниона управления вместо обычно используемого трёхмерного винта управления. Роль переменного состояния твердого тела играет в этом случае ненормированный бикватернион перемещения твердого тела, а роль управления — бикватернион кинематического винта с ненулевой скалярной частью. Такое введение дуального вектора состояния и дуального вектора управления позволяет провести синтез четырёхмерного стабилизирующего управления в бикватернионном виде без разделения бикватернионных уравнений движения на скалярную и винтовую части. Выделение скалярной и винтовой частей, необходимое для построения кинематического винта твердого тела (управления), проводится на конечной стадии (в конечных соотношениях).

Решение задачи синтеза стабилизирующего управления на основе бикватернионных моделей возмущенного винтового движения твердого тела, использующих нормированные бикватернионы перемещений и бикватернионы кинематических винтов с нулевыми скалярными частями, требует разделения уравнений возмущенного движения на скалярную и винтовую части в рамках самой процедуры синтеза, что приводит к более сложному решению задачи синтеза. Кроме того, законы управления, построенные на основе этих моделей, как уже отмечалось, вырождаются при определенном положении твердого тела в пространстве, в то время как использование при синтезе "четырёхмерных" бикватернионов угловых и линейных скоростей позволяет построить невырождающиеся законы управления.

Отметим, что использование бикватернионов конечных перемещений приводит к необходимым и достаточным условиям асимптотической устойчивости установившегося движения свободного твердого тела по уравнениям первого приближения, отличающимся от традиционно используемых. Эти условия для позиционно-интегральной коррекции заключаются в требовании отрицатель-

ности скалярных главных частей двух корней бикватернионного квадратного характеристического уравнения вместо требования отрицательности вещественных частей двенадцати корней обычного характеристического уравнения в случае использования для описания движения свободного твердого тела углов Эйлера—Крылова и прямоугольных декартовых координат. Это оказывается полезным при исследовании устойчивости и управления движением свободного твердого тела.

Отметим также, что в диссертации Е. И. Нелаевой (Ломовцевой) [Нелаева Е. И. Развитие бикватернионной теории кинематического управления и ее приложение к решению обратной задачи кинематики роботов-манипуляторов. Автореф. дис. канд. техн. наук; 05.13.01. Саратов, 2016. 19 с.] предложены алгоритмы формирования двух вышеуказанных стабилизирующих бикватернионных законов управления движением свободного твердого тела в нормированных и ненормированных бикватернионах, построенных по принципу обратной связи, а также предложены алгоритмы формирования полных бикватернионных кинематических управлений, включающих оптимальные программное и стабилизирующее управления. Эти алгоритмы применены Е. И. Нелаевой для численного решения обратных задач кинематики роботов-манипуляторов с использованием бикватернионной теории кинематического управления движением свободного твердого тела.

2.4. Построение программного перемещения свободного твердого тела, оптимального в смысле минимизации затрат на управление, для заданного времени переходного процесса. В диссертации Е. И. Нелаевой (Ломовцевой) рассмотрена в бикватернионной нелинейной кинематической постановке задача построения программного перемещения свободного твердого тела, оптимального в смысле минимизации затрат на управление, при наличии ограничений на модуль управления и заданном времени переходного процесса. Полагается, что управление движением осуществляется за счет сообщения твердому телу программного мгновенного винта скоростей. Эта задача является обобщением задачи оптимального кинематического программного разворота твердого тела, ранее рассмотренной А. В. Молоденковым [7, 1995] в кватернионной постановке.

Е. И. Нелаевой получен оптимальный программный бикватернионный кинематический закон управления движением свободного твердого тела, минимизирующий интеграл от суммы квадратов дуальных ортогональных проекций кинематического винта свободного твердого тела (интеграл от суммы квадратов управлений); найден в явном виде оптимальный программный бикватернионный закон перемещения тела за фиксированное время из

заданного начального положения в любое требуемое конечное положение под действием построенного оптимального управления. Закон управления движением свободного твердого тела построен с помощью применения принципа перенесения Котельникова—Штуди.

2.5. Аналитическое бикватернионное решение кинематической задачи оптимальной нелинейной стабилизации произвольного программного движения свободного твердого тела. В работах Ю. Н. Челнокова и Е. И. Нелаевой [21, 2015; 22, 2016] получено аналитическое решение в кинематической бикватернионной постановке задачи оптимальной нелинейной стабилизации произвольного программного движения свободного твердого тела. В качестве математических моделей движения используются бикватернионные кинематические уравнения возмущенного движения свободного твердого тела в нормированных бикватернионах конечных перемещений, а в качестве управлений — дуальные ортогональные проекции мгновенного винта скоростей движения тела на связанные с ним координатные оси или на оси инерциальной системы координат. Каждый из двух минимизируемых функционалов характеризует собой интегральную величину затрат на управление и квадратичных отклонений параметров движения свободного твердого тела от их программных значений, взятых в определенной пропорции, определяемой значениями весовых коэффициентов (т.е. минимизируется интеграл от взвешенной суммы квадратов компонент кинематического винта (управления) и суммы квадратичных отклонений параметров движения свободного твердого тела от их программных значений).

С помощью принципа максимума Понтрягина построены законы оптимального управления и дифференциальные уравнения задачи оптимизации. Найдено аналитическое решение этой задачи в бикватернионной и кватернионной формах. Оптимальное движение свободного твердого тела в текущий момент времени представляет собой асимптотически устойчивое мгновенное винтовое движение вдоль оси, имеющей в инерциальной (опорной) системе координат направление, противоположное направлению мгновенного винта ошибки ориентации и местоположения твердого тела в этой системе координат. В законы оптимального управления входят в явном виде коэффициенты функционала минимизации, управление может быть реализовано по принципу обратной связи.

Рассмотренная в работах [21, 22] кинематическая задача оптимального управления движением свободного твердого тел является обобщением кинематической задачи оптимальной нелинейной стабилизации произвольного углового (вращательного) движения твердого тела, изученной в работах [8, 10] в кватернионной постановке.

3. Задачи построения оптимальных законов изменения вектора кинетического момента твердого тела и законов оптимальных разворотов твердого тела

Промежуточное положение между кинематическими и динамическими задачами управления вращательным движением твердого тела занимают задачи построения оптимальных законов изменения вектора кинетического момента динамически симметричного твердого тела и твердого тела с произвольным распределением масс, сообщение которого твердому телу обеспечивает его перевод из произвольного начального углового положения в требуемое конечное угловое положение. Решения этих задач в кватернионных постановках даны в работах В. Г. Бирюкова, А. В. Молоденкова, Ю. Н. Челнокова [23, 2004], О. В. Зелепукиной, Ю. Н. Челнокова [24, 2011] и В. Г. Бирюкова, Ю. Н. Челнокова [25, 2014].

3.1. Построение оптимальных программных законов изменения ограниченного по модулю вектора кинетического момента динамически симметричного твердого тела. В работе [24] рассматривается задача построения оптимальных законов изменения вектора кинетического момента динамически симметричного твердого тела, сообщение которого твердому телу обеспечивает его перевод из произвольного начального углового положения в требуемое конечное угловое положение. В качестве минимизируемых функционалов используются комбинированные функционалы качества, один из которых характеризует в заданной пропорции расход времени и импульса квадрата модуля вектора кинетического момента, а другой — расход времени и импульса модуля вектора кинетического момента на переориентацию твердого тела. Управление (вектор кинетического момента твердого тела) полагается ограниченным по модулю. Решение задачи проводится с помощью принципа максимума Понтрягина и кватернионного дифференциального уравнения, связывающего вектор кинетического момента динамически симметричного твердого тела с кватернионом ориентации системы координат, вращающейся относительно твердого тела вокруг его оси динамической симметрии с угловой скоростью, пропорциональной проекции вектора кинетического момента тела на эту ось. Использование такой модели вращательного движения, предложенной Ю. Н. Челноковым, приводит к задаче оптимального управления с подвижным правым концом траектории и существенно упрощает аналитическое рассмотрение задачи построения оптимальных законов изменения вектора кинетического момента, поскольку в этой модели вместо кватерниона абсолютной угловой скорости твердого тела фигурирует в явном виде кватернион кинетического момента тела (управление).

В работе [24] построены общие аналитические решения дифференциальных уравнений краевых

задач, образующих системы девяти нелинейных дифференциальных уравнений. Показано, что решение дифференциальных краевых задач сводится к решению двух скалярных алгебраических трансцендентных уравнений. Получены как явные функции времени зависимости для кватерниона ориентации, вектора абсолютной угловой скорости и вектора кинетического момента твердого тела, описывающие программное оптимальное управляемое движение твердого тела. Построены соответствующие им законы изменения программных управляющих моментов для твердого тела — космического аппарата. Даны геометрические интерпретации управляемого углового движения твердого тела.

3.2. Построение оптимальных программных законов изменения вектора кинетического момента твердого тела, обеспечивающих перевод тела в требуемое угловое положение за фиксированное время. В работах [23, 25] рассматривается задача построения оптимальных программных законов изменения вектора кинетического момента твердого тела, сообщение которого телу переводит его из произвольного начального углового положения в требуемое конечное угловое положение за фиксированное время. Минимизируется интегральный квадратичный функционал качества с подынтегральным выражением, являющимся взвешенной суммой квадратов проекций вектора кинетического момента твердого тела. С помощью принципа максимума Л. С. Понтрягина установлены необходимые условия оптимальности. В случае сферически симметричного твердого тела задача имеет известное аналитическое решение. Когда тело имеет ось динамической симметрии, полученная краевая задача оптимизации сведена к решению системы двух нелинейных алгебраических уравнений. Для твердого тела с произвольным распределением масс законы оптимального управления найдены в виде эллиптических функций. Обсуждаются закономерности управляемого движения, а также использование построенных программных законов изменения вектора кинетического момента космического аппарата в системах управления его ориентацией с помощью внешних управляющих моментов или вращающихся маховиков.

3.3. Замечания о задаче построения оптимальных законов изменения вектора кинетического момента твердого тела. Следует отметить, что изученная в работах [23, 24, 25] задача построения оптимальных законов изменения вектора кинетического момента твердого тела отличается от кинематической задачи оптимального управления угловым движением твердого тела присутствием в уравнениях движения массово-инерционных характеристик твердого тела, т.е. его моментов инерции. В силу этого указанная задача принимает динамическую окраску, а ее решение изменяется кардинально. При условии динамической симметрии твердого тела получаемая дифференциальная краевая задача оптимизации сводится к решению системы двух

скалярных алгебраических трансцендентных уравнений, а в общем случае распределения масс твердого тела приходим к дифференциальной краевой задаче, которую можно решить лишь численно. Только для сферически симметричного твердого тела решение задачи построения оптимальных законов изменения вектора кинетического момента тела практически не отличается от известного аналитического решения задачи кинематического управления.

В работе [25] с помощью теоремы об изменении кинетического момента относительного движения механической системы показывается, что построенные оптимальные законы изменения вектора кинетического момента твердого тела позволяют найти оптимальные программные законы изменения кинетического момента управляющих маховиков. Такое решение не учитывает собственную динамику управляющих маховиков, однако помогает оценивать предельные возможности систем управления угловым движением космического аппарата, использующих в качестве исполнительных органов управляющие маховики, а также дает представление о характере оптимальных программных движений космического аппарата.

Список литературы

1. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах управления положением твердого тела // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1972. № 4. С. 24—31.
2. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Кинематическая задача ориентации во вращающейся системе координат // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1972. № 6. С. 36—43.
3. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.
4. Плотников П. К., Сергеев А. Н., Челноков Ю. Н. Кинематическая задача управления ориентацией твердого тела // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1991. № 5. С. 9—18 (Plotnikov P. K., Sergeev A. N., Chelnokov Yu. N. Kinematic control problem for the orientation of a rigid body // Mechanics of Solids. 1991. Vol. 37, N. 5. P. 7—16).
5. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: Наука, 1992. 280 с.
6. Панков А. А., Челноков Ю. Н. Исследование кватернионных законов кинематического управления ориентацией твердого тела по угловой скорости // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1995. № 6. С. 3—13 (Pankov A. A., Chelnokov Yu. N. Investigation of quaternion laws of kinematic control of solid body orientation in angular velocity // Mechanics of Solids. 1995. Vol. 33, N. 6. P. 3—13).
7. Молоденков А. В. Кватернионное решение задачи оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота твердого тела // Проблемы механики и управления: Межвуз. сб. науч. трудов. Пермь: Изд-во ПГУ, 1995. С. 122—131.
8. Бирюков В. Г., Челноков Ю. Н. Кинематическая задача оптимальной нелинейной стабилизации углового движения твердого тела // Математика. Механика: Сб. науч. трудов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2002. Вып. 4. С. 172—174.
9. Маланин В. В., Стрелкова Н. А. Оптимальное управление ориентацией и винтовым движением твердого тела. Москва; Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2004. 204 с.

10. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. М.: Физматлит, 2006. 512 с.
11. Челноков Ю. Н. Кватернионные модели и методы динамики, навигации и управления движением. М.: Физматлит, 2011. 560 с.
12. Стрелкова Н. А. Оптимальное по быстродействию кинематическое управление винтовым перемещением твердого тела // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1982. № 4. С. 73—76.
13. Челноков Ю. Н. Об интегрировании кинематических уравнений винтового движения твердого тела // Прикладная математика и механика. 1980. Т. 44, Вып. 1. С. 32—39 (Chelnokov Yu. N. On integration of kinematic equations of a rigid body's screw-motion // Applied mathematics and mechanics. 1980. Vol. 44, N. 1. P. 19—23).
14. Челноков Ю. Н. Об одной форме уравнений инерциальной навигации // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1981. № 5. С. 20—28 (Chelnokov Yu. N. One form of the equations of inertial navigation // Mechanics of Solids. 1981. Vol. 16, N. 5. Pp. 16—23).
15. Dapeng Han, Qing Wei, Zexiang Li. Kinematic Control of Free Rigid Bodies Using Dual Quaternions // International Journal of Automation and Computing. July 2008. 05 (3). P. 319—324.
16. Kim M. J., Kim M. S., Shin S. Y. A Compact Differential Formula for the First Derivative of a Unit Quaternion Curve // Journal of Visualization and Computer Animation. 1996. Vol. 7, N. 1. P. 43—57.
17. Dapeng Han, Qing Wei, Zexiang Li, Weimeng Sun. Control of Oriented Mechanical systems: A Method Based on Dual Quaternion // Proc. of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, July 6—11 2008. P. 3836—3841.
18. Dapeng Han, Qing Wei, Zexiang Li. A Dual-quaternion Method for Control of Spatial Rigid Body. Networking, Sensing and Control // IEEE International Conference. 6—8 April 2008. P. 1—6.
19. Ozgur E., Mezouar Y. Kinematic modeling and control of a robot arm using unit dual quaternions // Robotics and Autonomous Systems. 2016. Vol. 77. P. 66—73.
20. Челноков Ю. Н. Бикватернионное решение кинематической задачи управления движением твердого тела и его приложение к решению обратных задач кинематики роботов-манипуляторов // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2013. № 1. С. 38—58 (Chelnokov Yu. N., Biquaternion Solution of the Kinematic Control Problem for the Motion of a Rigid Body and Its Application to the Solution of Inverse Problems of Robot-Manipulator Kinematics // Mechanics of Solids. 2013. Vol. 48, N. 1. P. 31—46).
21. Челноков Ю. Н., Нелаева Е. И. Аналитическое бикватернионное решение кинематической задачи оптимальной нелинейной стабилизации произвольного программного движения свободного твердого тела // Материалы XX Международной научной конференции "Системный анализ, управление и навигация". М.: Изд-во МАИ, 2015. С. 133—135.
22. Челноков Ю. Н., Нелаева Е. И. Бикватернионное решение кинематической задачи оптимальной нелинейной стабилизации произвольного программного движения свободного твердого тела // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2016. Т. 16, Вып. 2. С. 198—206.
23. Бирюков В. Г., Молоденков А. В., Челноков Ю. Н. Оптимальное управление ориентацией космического аппарата с использованием в качестве управления вектора кинетического момента // Математика. Механика: Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2004. Вып. 6. С. 171—173.
24. Зелепукина О. В., Челноков Ю. Н. Построение оптимальных законов изменения вектора кинетического момента динамически симметричного твердого тела // Известия РАН. Механика твердого тела. 2011. № 4. С. 31—49 (Zelepukina O. V., Chelnokov Yu. N. Construction of Optimal Laws of variation in Angular Momentum Vector of a Dynamically Symmetric Rigid Body // Mechanics of Solids. 2011. Vol. 46, N. 4. P. 519—533).
25. Бирюков В. Г., Челноков Ю. Н. Построение оптимальных законов изменения вектора кинетического момента твердого тела // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2014. № 5. С. 3—21 (Biryukov V. G., Chelnokov Yu. N. Construction of Optimal Laws of Variation of the Angular Momentum Vector of a Rigid Body // Mech. Solids. 2014. Vol. 49 (5). P. 479—494).

Theory of Kinematic Motion Control of a Rigid Body

Yu. N. Chelnokov, ChelnokovYuN@gmail.com✉,

Institute of Precision Mechanics and Control Problems, RAS, Saratov, 410028, Russian Federation

Corresponding author: Chelnokov Yuri N., D. Sc., Head of Laboratory of Mechanics, Navigation and Motion Control, Institute of Precision Mechanics and Control Problems, RAS, Saratov, 410028, Russian Federation, e-mail: ChelnokovYuN@gmail.com

Received on February 13, 2017

Accepted on February 21, 2017

The authors present a review of the works on the theory of kinematic control of the rotational (angular) motion of a rigid body and spatial motion of a free rigid body, which is a composition of the rotational and translational (trajectory) movements of a rigid body. The theory is based on the use of the quaternion and biquaternion kinematic models of the rigid body motion. They also provide a review of the papers devoted to the problems of construction of the optimal laws of change of the angular momentum of a dynamically symmetric rigid body and rigid body with an arbitrary mass distribution, which ensures its optimal translation from an arbitrary initial angular position to the desired final angular position. These tasks occupy an intermediate position between the kinematic and dynamic problems of control of the rotational rigid body motion and play an important role in the theory of control of orientation of the spacecraft using the rotating flywheels. The theory of kinematic motion control has various topical applications in the space flight mechanics, inertial navigation, and mechanics of robotics.

Keywords: kinematic control, rigid body, rotational (angular) movement, translational (trajectory) movement, quaternion, biquaternion

For citation:

Chelnokov Yu. N. Theory of Kinematic Motion Control of a Rigid Body, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 435–446.

DOI: 10/17587/mau.18.435-446

References

1. Branets V. N., Shmyglevskii I. P. *Primenenie kvaternionov v zadachakh upravleniya polozheniem tverdogo tela* (Application of quaternions in rigid body control problems), *Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela*, 1972, no. 4, pp. 24–31 (in Russian).
2. Branets V. N., Shmyglevskii I. P. *Kinematicheskaya zadacha orientatsii vo vrashchaiushcheisya sisteme koordinat* (Kinematic problem of orientation in the rotating coordinate system), *Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela*, 1972, no. 6, pp. 36–43 (in Russian).
3. Branets V. N., Shmyglevskii I. P. *Primenenie kvaternionov v zadachakh orientatsii tverdogo tela* (The use of quaternions in problems of rigid body orientation.), Moscow, Nauka, 1973, 320 p. (in Russian).
4. Plotnikov P. K., Sergeev A. N., Chelnokov Yu. N. Kinematic control problem for the orientation of a rigid body, *Mechanics of Solids*, 1991, vol. 37, no. 5, pp. 7–16.
5. Branets V. N., Shmyglevskii I. P. *Vvedenie v teoriyu besplatfornennykh inertial'nykh navigatsionnykh sistem* (Introduction to the theory of strapdown inertial navigation systems), Moscow, Nauka, 1992, 280 p. (in Russian).
6. Pankov A. A., Chelnokov Yu. N. Investigation of quaternion laws of kinematic control of solid body orientation in angular velocity, *Mechanics of Solids*, 1995, vol. 33, no. 6, pp. 3–13.
7. Molodtsov A. V. *Kvaternionnoe reshenie zadachi optimal'nogo v smysle minimuma energeticheskix zatrat razvorota tverdogo tela* (Quaternion solution of the problem of the minimum expenditure of energy of a rigid body rotation), *Problemy mekhaniki i upravleniya. Sb. nauchn. trudov*, Perm, Publishing house of PGU, 1995, pp. 122–131.
8. Biryukov V. G., Chelnokov Yu. N. *Kinematicheskaya zadacha optimal'noi nelineinoy stabilizatsii uglovogo dvizheniya tverdogo tela* (Kinematic problem of optimal nonlinear stabilization of the angular motion of a rigid body), *Matematika. Mekhanika: Sb. nauch. trudov*, Saratov, Publishing house of Saratovskii university, 2002, no. 4, pp. 172–174 (in Russian).
9. Malanin V. V., Strelkova N. A. *Optimal'noe upravlenie orientatsiei i vintovym dvizheniem tverdogo tela* (Optimal control of orientation and screw rigid body motion), Moscow, Izhevsk, NITs "Reguliarnaya i khaoticheskaya dinamika", 2004, 204 p. (in Russian).
10. Chelnokov Yu. N. *Kvaternionnye i bikvaternionnye modeli i metody mekhaniki tverdogo tela i ikh prilozheniya. Geometriya i kinematika dvizheniya* (Quaternion and bi-quaternion models and methods of solid state mechanics and their applications. Geometry and kinematics of motion.), Moscow, Fizmatlit, 2006, 512 p. (in Russian).
11. Chelnokov Yu. N. *Kvaternionnye modeli i metody dinamiki, navigatsii i upravleniya dvizheniem* (Quaternion models and methods of dynamics, navigation and motion control), Moscow, Fizmatlit, 2011, 560 p. (in Russian).
12. Strelkova N. A. *Optimal'noe po bystrodeistviyu kinematicheskoe upravlenie vintovym peremeshcheniem tverdogo tela* (Optimal speed control screw kinematic motion of a rigid body), *Izv. AN SSSR. Mekhanika Tverdogo Tela*, 1982, no. 4, pp. 73–76 (in Russian).
13. Chelnokov Yu. N. On integration of kinematic equations of a rigid body's screw-motion, *Applied Mathematics and Mechanics*, 1980, vol. 44, no. 1, pp. 19–23 (in Russian).
14. Chelnokov Yu. N. One form of the equations of Inertial navigation, *Mechanics of Solids*, 1981, vol. 16, no. 5, pp. 16–23.
15. Dapeng Han, Qing Wei, Zexiang Li. Kinematic Control of Free Rigid Bodies Using Dual Quaternions, *International Journal of Automation and Computing*, July 2008, 05 (3), pp. 319–324.
16. Kim M. J., Kim M. S., Shin S. Y. A Compact Differential Formula for the First Derivative of a Unit Quaternion Curve, *Journal of Visualization and Computer Animation*, 1996, vol. 7, no. 1, pp. 43–57.
17. Dapeng Han, Qing Wei, Zexiang Li, Weimeng Sun. Control of Oriented Mechanical systems: A Method Based on Dual Quaternion, *Proc. of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6–11 2008, pp. 3836–3841.
18. Dapeng Han, Qing Wei, Zexiang Li. A Dual-quaternion Method for Control of Spatial Rigid Body. Networking, Sensing and Control, *IEEE International Conference*, 6–8 April 2008, pp. 1–6.
19. E. Ozgur, Y. Mezouar. Kinematic modeling and control of a robot arm using unit dual quaternions, *Robotics and Autonomous Systems*, 77 (2016), pp. 66–73.
20. Chelnokov Yu. N., Biquaternion Solution of the Kinematic Control Problem for the Motion of a Rigid Body and Its Application to the Solution of Inverse Problems of Robot-Manipulator Kinematics, *Mechanics of Solids*, 2013, vol. 48, no. 1, pp. 31–46.
21. Chelnokov Yu. N., Nelaeva E. I. *Analiticheskoe bikvaternionnoe reshenie kinematicheskoi zadachi optimal'noi nelineinoy stabilizatsii proizvol'nogo programmno dvizheniya svobodnogo tverdogo tela* (Analytical biquaternion solution of kinematic problem of optimal nonlinear stabilization of arbitrary program motion of free rigid body), *Materialy XX mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Sistemnyi analiz, upravlenie i navigatsiya"*, Moscow, Publishing house of MAI, 2015, pp. 133–135 (in Russian).
22. Chelnokov Yu. N., Nelaeva E. I. *Bikvaternionnoe reshenie kinematicheskoi zadachi optimal'noi nelineinoy stabilizatsii proizvol'nogo programmno dvizheniya svobodnogo tverdogo tela* (Solving kinematic problem of optimal nonlinear stabilization of arbitrary program movement of free rigid body), *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 198–206 (in Russian).
23. Biryukov V. G., Molodtsov A. V., Chelnokov Yu. N. *Optimal'noe upravlenie orientatsiei kosmicheskogo apparata s ispol'zovaniem v kachestve upravleniya vektora kineticheskogo momenta* (Optimal control of spacecraft attitude using the angular momentum vector as control), *Matematika. Mekhanika: Sb. nauch. tr.*, Saratov, Publishing house of Saratovskii university, 2004, no. 6, pp. 171–173 (in Russian).
24. O. V. Zelepukina, Yu. N. Chelnokov. Construction of Optimal Laws of variation in Angular Momentum Vector of a Dynamically Symmetric Rigid Body, *Mechanics of Solids*, 2011, vol. 46, no. 4, pp. 519–533.
25. V. G. Biryukov and Yu. N. Chelnokov. Construction of Optimal Laws of Variation of the Angular Momentum Vector of a Rigid Body, *Mechanics of Solids*, 2014, vol. 49, no. 5, pp. 479–494.

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., gradet@ipmnet.ru,
М. М. Князьков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **Л. Н. Кравчук**, вед. конструктор,
А. А. Крюкова, инженер, **Е. А. Семенов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
А. Н. Суханов, мл. науч. сотр., **В. Г. Чашухин**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
 Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН)

Управляемое формирование вакуума в устройствах сцепления с поверхностями при движении мобильных роботов с аэродинамическим прижимом¹

Рассматриваются процессы генерации вакуума в устройствах сцепления при движении мобильных роботов по сложным ферромагнитным или неферромагнитным поверхностям с использованием центробежного насоса и турбины, а также действие разработанной на основе аэродинамического прижима системы, предназначенной для осуществления движения по вертикальным поверхностям. Анализируется процесс получения разреженного воздуха в камере и возможность регулирования силы прижима за счет изменения величины зазора между поверхностями перемещения робота. Приводятся экспериментальные характеристики давления, силы отрыва и изменения процесса вакуумирования.

Ключевые слова: центробежный насос, турбина, мобильный робот, характеристики воздушного потока, управление силой прижатия

Введение

Многие современные манипуляционные роботы снабжены вакуумными захватами для работы с изделиями с различной формой поверхностей соприкосновения с захватом [1—5]. Мобильные роботы, в частности роботы, перемещающиеся по сложным поверхностям, а также по поверхностям, расположенным под различными углами к горизонту, осуществляют закрепление на поверхностях также посредством вакуумных контактных устройств [6—15]. Если качество или форма поверхностей заранее не известны, то для осуществления надежного сцепления возникает необходимость автоматического распознавания свойств поверхности и приспособления к ним, т.е. применения способов адаптации к поверхностям. Несмотря на достигнутые результаты проблема адаптации вакуумных контактных устройств к поверхностям с заранее неизвестными свойствами до настоящего времени полностью не решена и требует разработки новых подходов. Один из них основывается на развитии методов моделирования взаимодействия вакуумных контактных устройств с поверхностями различного качества. В работе [16] приведены результаты разработки различных моделей и анализ использования моделирования в целях оценки показателей эффективности действия таких контактных устройств. Обсуждаются наиболее развитые и

применяемые модели: имитационная модель системы удержания робота на вертикальной поверхности, модель системы с аэродинамическим прижимом. При создании моделей учитывается возможность образования утечек при контакте с поверхностью, хаотическое распределение трещин на поверхности и возможность управления поступательным движением робота на основе конечного автомата. Уделено внимание статистическому моделированию системы удержания робота на поверхности и оценке ее эффективности.

Получают развитие способы пассивной адаптации, основанные на оригинальных конструктивных решениях устройств контакта и применении материалов с необходимыми упругими и износостойкими свойствами и многоячеистой структурой. Предпосылки для разработки контактных устройств роботов различных размеров, обладающих свойствами приспособления к поверхностям неизвестного заранее качества, отмечались ранее во многих исследованиях, например в работах [17—21]. Определенный интерес представляют мобильные роботы, предназначенные для движения по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. В этих случаях бывает необходимо использование методов активной и пассивной адаптации.

В данной статье рассматриваются процессы создания вакуума посредством центробежного насоса и вентилятора в целях адаптации робота к поверхности, вдоль которой происходит движение.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-04117.

1. Некоторые характеристики вихревого течения в устройствах генерации вакуума, спроектированных на основе центробежного насоса или турбины

Рассмотрим более подробно способы удержания робота на вертикальной поверхности с помощью различных устройств генерации вакуума. На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) представлен мобильный робот с аэродинамическим прижатием к поверхности, основанным на работе центробежного насоса. Движение потоков воздуха между корпусом робота и поверхностью прижатия схематично представлено стрелками. Зазор x между корпусом робота и поверхностью перемещения может варьироваться. Здесь P_n и Q_n — давление воздуха и расход в области нагнетания; P_y и Q_y — разрежение и расход в области создания вакуума.

Аэродинамическое устройство прижима включает в себя насос и корпус робота, основание которого образует с поверхностью перемещения перемещенное пневматическое сопротивление. Поток через это сопротивление зависит от зазора x и отсутствует при x , близком к нулю. На рис. 1 цифрами обозначены области с различными характеристиками воздушного потока: 1 — область аэродинамического сопротивления; 2 — область нагнетания воздуха.

Другая конструкция робота с аэродинамическим прижатием предполагает использование турбины (рис. 2, см. вторую сторону обложки). Конструкция данного робота аналогична конструкции робота с центробежным насосом, за исключением устройства генерации вакуума. Движение потоков воздуха между корпусом робота и поверхностью прижатия схематично представлено стрелками. В отличие от центробежного насоса потоки воздуха в данном случае проходят прямотоком сквозь турбину.

Скорость течения внутри вихревой камеры может быть выражена через радиальную и тангенциальную составляющие. Распределение тангенциальных скоростей выражается обычно в виде степенной зависимости [22], что учитывается в дальнейшем изложении при нахождении перепада и градиента давления:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{R}{r}, \quad (1)$$

где w_1 , v_1 — угловая и линейная тангенциальные скорости потока; w_2 , v_2 — угловая и линейная радиальные скорости потока; R — радиус вихревой камеры; r — переменный радиус образовавшегося вихревого потока.

Предположим, что градиент давления в радиальном направлении представляется в виде

$$\frac{dp}{dr} = \rho \frac{v_1^2}{r}. \quad (2)$$

Учитывая, что $v_1 = v_2 \left(\frac{R}{r} \right)$, получим

$$dp = \rho v_2^2 \frac{R^2}{r^3} dr. \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3) в пределах от r_2 до R , получим

$$\Delta p = \frac{\rho v_2^2}{2} \left[\left(\frac{R}{r_2} \right)^2 - 1 \right]. \quad (4)$$

Давление на выходе в области вакуумирования равно

$$P_2 = P_a - \rho \frac{v_2^2}{2} \left[\left(\frac{R}{r_2} \right)^2 - 1 \right], \quad (5)$$

где P_a — атмосферное давление.

Рассмотрим зависимости между параметрами для центробежного насоса и вентилятора.

Если мощность вентилятора тратится только на создание вакуума, то давление, создаваемое вентилятором или центробежным насосом, можно рассчитывать по формуле

$$P = P_1 + \frac{\nu^2}{2} \rho. \quad (6)$$

Здесь P_1 — разрежение при всасывании; ν — скорость воздуха на выходе; ρ — плотность при условиях всасывания, которая зависит от газовой постоянной, температуры, давления и влажности.

Массовое количество воздуха, откачиваемого вентилятором, равно

$$m = \rho Q, \quad (7)$$

где Q — объемный расход.

Полное давление, развиваемое вентилятором, зависит от коэффициента формы лопаток ϕ , плотности ρ и скорости U_2 на выходе из крыльчатки, соответствующей наружной окружности, где расположены концы лопаток:

$$p = \phi U_2^2 \rho, \quad (8)$$

$\phi = 1, 1 \dots 0,5$, в зависимости от формы лопаток:

- для лопаток, загнутых вперед, $\phi = 1, 0 \dots 1, 1$;
- для лопаток радиальных $\phi = 0, 9 \dots 0, 7$;
- для лопаток, загнутых книзу, $\phi = 0, 7 \dots 0, 5$.

Для соотношения параметров центробежного насоса и вентилятора справедлив закон пропорциональности. Давление, развиваемое центробежным насосом или вентилятором, пропорционально квадрату скорости вращения, т.е.

$$P_2 = \frac{w_2^2}{w_1^2} P_1; \quad (9)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\Pi_1^2}{\Pi_2^2}. \quad (10)$$

Производительность насоса прямо пропорциональна средней скорости вращения:

$$Q_2 = \frac{w_1}{w_2} Q_1. \quad (11)$$

Здесь P_1 , P_2 и Q_1 , Q_2 — соответственно давление и расход при скоростях вращения w_1 и w_2 . Зависимость давления от расхода следующая:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{Q_1^2}{Q_2^2} = \text{const}, \quad (12)$$

что позволяет определить давление, а значит, и силу прижатия к поверхности устройства сцепления. Мощность пропорциональна кубу скорости вращения колеса, т.е.

$$\frac{N_1}{Q_1^3} = \frac{N_2}{Q_2^3}, \text{ или } N_2 = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3 N_1. \quad (13)$$

Для расчета рабочего режима в системе "центробежный насос — устройство сцепления с поверхностью" или "вентилятор — устройство сцепления с поверхностью" необходимо совместное решение уравнений зависимости давлений от расхода насоса или вентилятора и устройства сцепления.

Если в общем виде для насоса зависимость давления от расхода известна, а для устройства сцепления существует некоторое нелинейное соотношение между P и Q , в то же время зависящее от зазора x , которое можно найти экспериментально, то возможно графическое определение рабочей точки А.

Вид рабочих характеристик насоса и аэродинамического сопротивления устройства прижима, зависимости давления от расхода в относительных координатах представлены на рис. 3, а, б. Здесь P_n , P_y и Q_n , Q_y — соответственно давления и расходы в полостях насоса и камеры аэродинамического устройства прижима; $P_{но}$, P_{yo} и $Q_{но}$, Q_{yo} — усредненные значения давлений и расходов в полости насоса и камеры аэродинамического устройства прижима.

Нахождение точки рабочего режима показано на рис. 4, где совмещены зависимости давления от расхода для насоса 1 и аэродинамического сопротивления устройства прижима 2, 3 и 4. При этом график 2 соответствует номинальному режиму работы, а графики 3, 4 показывают отклонение от номинального режима. Эта точка определяет подачу необходимого количества воздуха данным устройством нагнетания в систему и развиваемое при этом давление. Таким образом, точка пересечения является рабочей точкой рассматриваемой системы. Включение обратной связи по давлению соответствует адаптивному режиму работы, когда в результате регулируемой адаптации графики 3 и 4 приближаются к графику 2, а совмещение их определяет завершение адаптации.

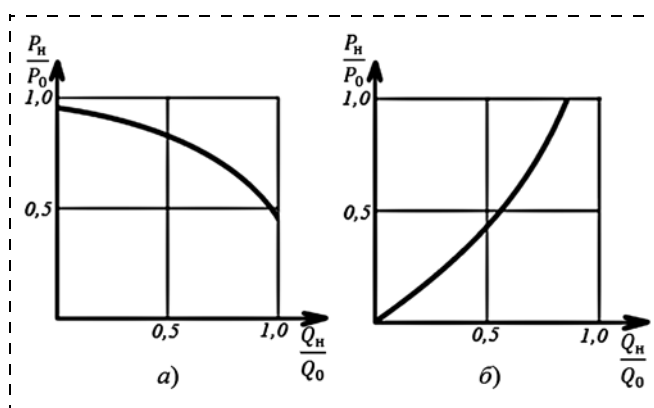


Рис. 3. Рабочие качественные характеристики насоса (а) и камеры аэродинамического устройства прижима (б)

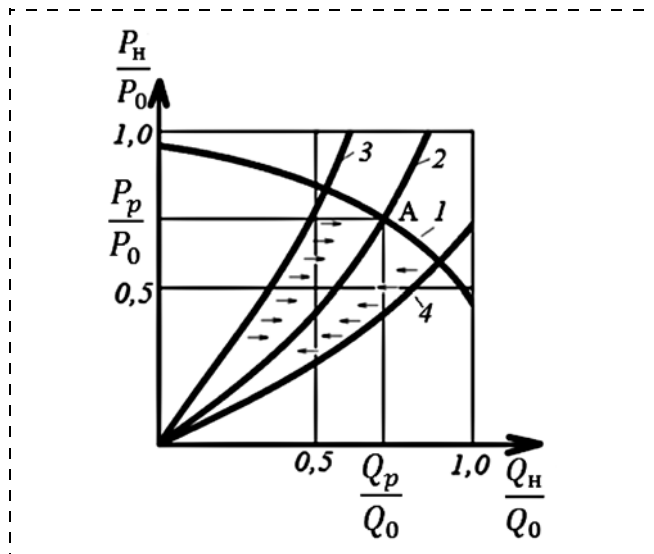


Рис. 4. Нахождение рабочего режима системы "вентилятор или насос — устройство прижима к поверхности": 1 — характеристика насоса; 2, 3, 4 — характеристика сопротивления устройства прижима к поверхности; А — рабочая точка

Аналогичная обратная связь по току, протекающему в обмотке возбуждения ротора двигателя, установленного на крыльчатке, определяет адаптацию по силе прижима.

2. Экспериментальное исследование создания вакуума с помощью центробежного насоса и вентилятора

Для определения рациональных характеристик зазора x , силы тока потребления I и силы прижатия F были проведены экспериментальные исследования. На рис. 5 представлена зависимость $F = F(x)$.

По результатам экспериментальных исследований была определена эффективная сила прижатия работа к поверхности перемещения от зазора x в диапазоне от 0,5 до 5 мм.

Как видно из полученных характеристик, сила F для роботов с центробежным насосом принимала максимальные значения при зазоре 0,5 мм. В экспериментах, проведенных с устройством генерации вакуума, основанном на турбине, сила F при-

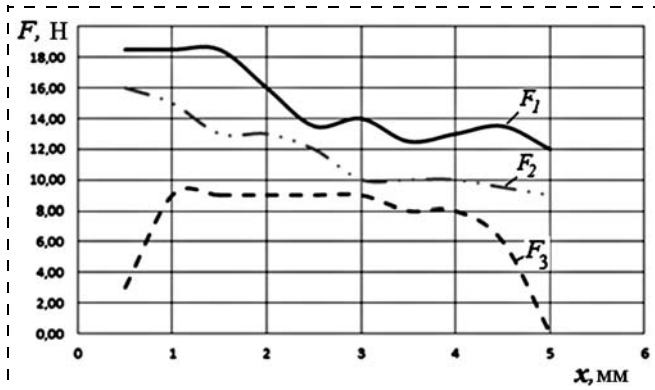


Рис. 5. Зависимость силы прижатия устройства сцепления с поверхностью от величины зазора x : F_1 — центробежный насос повышенной мощности; F_2 — центробежный насос; F_3 — турбина

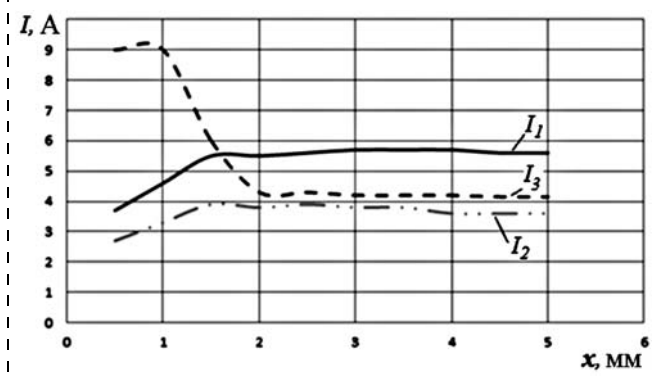


Рис. 6. Зависимость силы тока в обмотке ДПТ с независимым возбуждением устройства прижатия от величины зазора: I_1 — центробежный насос повышенной мощности; I_2 — центробежный насос; I_3 — турбина

нимала максимальные значения при зазоре между роботом и поверхностью, равном 1 мм.

Для минимизации потребления энергии были исследованы токи в обмотках возбуждения электродвигателей постоянного тока (ДПТ), приводящих в движение элементы конструкции устройств генерации вакуума. Как видно из полученных результатов (рис. 6), наименьшее потребление энергии роботом с центробежным насосом соответствует диапазону изменения зазора от 0,5 до 1 мм. Потребление энергии для приведения в движение турбины в работе второго типа показало минимальное значение силы тока при зазоре от 2 до 5 мм.

В полости вакуумного контактного устройства сцепления с поверхностями давление P_2 зависит от зазора между плоскостью, по которой происходит перемещение робота, и торцевой поверхностью вакуумного контактного устройства, т.е. $P_2 = P_2(x)$.

При этом надо иметь в виду, что зависимость $P_2 = P_2(x)$ в общем случае нелинейна.

Если $x \geq x_{\text{пр}}$, то $P_2 = P_a$, вакуум не образуется и контакт с плоскостью перемещения нарушается. Если $0 \leq x < x_{\text{пр}}$, то $P_2 \leq \bar{P}_2$, где $\bar{P}_2$ — предельное давление, то образуется вакуум за счет работы тур-

бины вентиляторного или турбинного насоса за счет действия образующегося завихренного потока в емкости вакуумного контактного устройства, которой является емкость корпуса робота. Нормальная сила прижима корпуса робота, связанного с вакуумным контактным устройством, вычисляется по формуле

$$N = (P_a - P_2)S - kx,$$

где S — эффективная площадь контакта робота с поверхностью перемещения; x — переменный зазор между контактируемой поверхностью торца робота с поверхностью перемещения; k — коэффициент упругости эластичного материала торца корпуса робота.

Заключение

В статье приведены результаты исследований аэродинамического устройства прижима мобильного робота к поверхности движения с применением центробежного насоса и вентилятора. Рассматривается вихревое движение воздуха в таких устройствах аэродинамического прижима и основные параметры. Приводится графическое определение рабочих режимов, в том числе на основе методов адаптации. Получены экспериментальные зависимости силы прижатия устройства сцепления с поверхностью от зазора между поверхностями контакта в фазе перемещения робота. Анализируются характеристики силы тока в обмотке возбуждения электродвигателей постоянного тока, приводящих в движение элементы конструкции устройств генерации вакуума, в зависимости от зазора.

Список литературы

1. Краснослободцев В. Я., Скворцов В. Ю. Адаптивные пневмовакuumные захваты и опоры роботов. С.-Петербург: Техн. Университет, 1996. 100 с.
2. Системы осязания и адаптивные промышленные роботы / Под ред. Е. П. Попова. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
3. Фу Г., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 620 с.
4. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Манипуляционные роботы. Динамика, управление, оптимизация. М.: Наука, 1989. 363 с.
5. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Кравчук Л. Н., Самохвалов Г. В., Чашухин В. Г. Устройство для промывки гладких поверхностей. Патент № 132327 от 27.03.2013.
6. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Автономное вакуумное захватное устройство микроробота. Патент RU 2266810 C1, № 36, 2005 г.
7. Барабанов Г. П., Богданов С. В., Барабанов В. Г. Очувствительный вакуумный захват. Патент RU 2283751 C1, Бюл. № 26, 2005 г.
8. Сысоев С. Н., Кузнецов Р. В., Пронин А. В., Александров И. В., Пасечник М. А. Вакуумный захватный корректирующий модуль. Патент RU 2431561 C2. Бюл. № 29, 2011 г.
9. Longo D., Muscato G. Adhesion techniques for climbing robots: state of the art and experimental consideration // Proc. of 11th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2008), 08–10 September 2008, Coimbra, Portugal.
10. Luk B., Collie A., Billingsley J. Robug II: An intelligent wall climbing robot // Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. 1991. Vol. 3 P. 2342–2347.

11. Schmidt D., Berns K., Ohr J. Analysis of sliding suction cups for negative pressure adhesion of a robot climbing on concrete walls // Adaptive Mobile Robotics. Proc. of the 15th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2012), 23–26 July 2012, Baltimore, USA. P. 813–820.

12. Illingworth L., Reinfeld D. Vortex attractor for planar and non-planar surfaces. U. S.A. Patent 6.619.922, Sept. 16. 2003.

13. Градецкий В. Г. Динамические процессы в миниатюрных мобильных роботах с вакуумным контактом к поверхностям перемещения // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 2. С. 104–105.

14. Градецкий В. Г., Фомин Л. Ф. Динамические процессы в системах создания вакуума миниатюрных мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 9. С. 10–14.

15. Каталог продукции компании Camozzi. URL: www.camozzi.com (дата обращения: 19.10.2016).

16. Тачков А. А., Калинин С. В., Малихин А. Ю. Моделирование и оценка эффективности системы удержания малогабаритного автономного робота вертикального перемещения с вакуумными захватами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 3. С. 178–186.

17. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Фомин Л. Ф., Чашукин В. Г. Механика миниатюрных роботов. М.: Наука, 2010. 271 с.

18. Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калинин С. В., Кравчук Л. Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001. 359 с.

19. Apostolescu T. C., Udrea C., Duminica D., Iorasco C., Bogato L., Laurentiu A. C. Development of a climbing robot with vacuum attachment cups // Proc. of International Conference MECHITECH'11, September 22–23. 2011. Bucharest. P. 258–267.

20. Watanabe M., Tsukagoshi H. Snail inspired climbing robot using fluid adhesion to travel on rough concrete walls and ceilings // Advanced in cooperative robotics. Proc. of CLAWAR-2016, 12–14 September 2016, London, UK. P. 79–87.

21. Yamaguchi T., Go T., Yamada Y., Nakamura T. Development of negative pressure suction mechanism in omnidirectional wall-climbing robot for inspection of airplanes // Advanced in cooperative robotics. Proceedings of CLAWAR — 2016, 12–14 September 2016, London, UK. P. 106–114.

22. Семидуберский М. С. Насосы, компрессоры, вентиляторы. М.: Высшая школа, 1966. 262 с.

Vacuum Control in the Surface Attaching Devices of the Mobile Robots during their Movement under the Aerodynamic Attachment Force

V. G. Gradetsky, gradet@ipmnet.ru, M. M. Knyazkov, L. N. Kravchuk, A. A. Kriukova, E. A. Semenov, A. N. Sukhanov, V. G. Chashchukhin,

Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, 101-1, Pr. Vernadskogo, Moscow, 119526, Russian Federation

Corresponding author: Sukhanov Artjom N., Junior Researcher, Laboratory of Robotics and Mechatronics, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: s_chernakova@rambler.ru

Received on July 30, 2016

Accepted on December 31, 2016

During the movement of the horizon mobile robots over different complex ferromagnetic and non-ferromagnetic surfaces, like walls, ceilings or slopes of various angles, their contacts with the surfaces can be realized by the attaching devices, which ensure an aerodynamic attachment force due to creation of vacuum. In industrial robotics such devices are designed for grasping objects with manipulators on the assembly lines. In the mobile robotics such devices are suitable for creation of an attachment force for the robots. The control system provides an aerodynamic attachment force due to control of the pressure level inside the vacuum area. This ensures adaptation for the mobile robots moving over the surfaces with different quality parameters. This paper describes creation of vacuum with a centrifugal pump and a turbine. It also presents an attachment device based on a centrifugal pump or a turbine, which can create an aerodynamic attachment force for movement of a mobile robot over the sloped surfaces. The air pressure inside the turbine depends on the shape of the blades, the air density and the circumferential speed of the blades. The air pressure created by the centrifugal pump or the turbine is proportional to the blades' rotary speed squared. The dependence of the air pressure on the air flow is obtained. This ensures calculation of the attachment force for the control system of a mobile robot. Simultaneous solving of the equations presented in this paper for the air pressure and the air flow provides an opportunity to obtain the operating modes for different types of the vacuum devices based on a centrifugal pump or a turbine. A possibility of the aerodynamic attachment force control by varying of the gap between the mobile robot and the surface is analyzed. Various parameters of air, such as density, average velocity and flow rate, are discussed. Creation of vacuum inside the vacuum area is considered. The experimental results concerning the pressure control, the attachment force and vacuum creation are presented.

Keywords: centrifugal pump, turbine, mobile robot, air flow parameters, aerodynamic attachment force control

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 15-08-04117.

For citation:

Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Kravchuk L. N., Kriukova A. A., Semenov E. A., Sukhanov A. N., Chashchukhin V. G. Vacuum Control in the Surface Attaching Devices of the Mobile Robots during their Movement under the Aerodynamic Attachment Force, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 447–452.

DOI: 10.17587/mau.18.447-452

References

1. Krasnoslobodtsev V. Y., Skvorcov V. Y. *Adaptivnye pnevmovakuumnye zahvaty i opory robotov* (Adaptive pneumatic grippers and robots' legs), S.-Peterburg, Publishing house of SPb., Tekhn. Universitet, 1996, 100 p. (in Russian).
2. Popov E. P. *Sistemy ochuvstvleniya i adaptivnye promyshlennyye roboty* (Feedback systems and adaptive industrial robots), Moscow, Mashinostroyeniye, 1985, 256 p. (in Russian).
3. Fu G., Gonsales R., Li K. *Robototekhnika* (Robotics), Moscow, Mir, 1989, 620 p. (in Russian).

4. Chernousko F. L., Bolotnik N. N., Gradeckij V. G., *Manipulyacionnye roboty. Dinamika, upravlenie, optimizatsiya* (Manipulators. Dynamics, control, optimization), Moscow, Nauka, 1989, 363 p. (in Russian).
5. Gradeckij V. G., Knyazkov M. M., Kravchuk L. N., Samohvalov G. V., Chashchuhin V. G. *Ustrojstvo dlya promytki gladikih poverhnostej* (The device for plane surfaces cleaning), Patent № 132327, 27.03.2013 (in Russian).
6. Darincev O. V., Migranov A. B. *Avtonomnoe vakuumnoe zahvatnoe ustrojstvo mikrorobota* (Autonomous vacuum gripper for micro-robot), Patent RU 2266810 C1, № 36, 2005 (in Russian).
7. Barabanov G. P., Bogdanov S. V., Barabanov V. G. *Ochuvstvennyy vakuumnyy zahvat* (Vacuum gripper with feedback), Patent RU 2283751 C1, Byul. № 26, 2005 (in Russian).
8. Sysoev S. N., Kuznecov R. V., Pronin A. V., Aleksandrov I. V., Pasechnik M. A. *Vakuumnyy zahvatnyy korrektruyushchij modul* (Vacuum gripper with correcting device), Patent RU 2431561 C2. Ballot № 29, 2011 (in Russian).
9. Longo D., Muscato G. Adhesion techniques for climbing robots: state of the art and experimental consideration, *Proc. of 11th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2008)*, 08–10 September 2008, Coimbra, Portugal.
10. Luk B., Collie A., Billingsley J. Robug I. I.: An intelligent wall climbing robot, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1991, vol. 3, pp. 2342–2347.
11. Schmidt D., Berns K., Ohr J. Analysis of sliding suction cups for negative pressure adhesion of a robot climbing on concrete walls, *Adaptive Mobile Robotics. Proc. of the 15th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots (CLAWAR-2012)*, 23–26 July 2012, Baltimore, USA, pp. 813–820.
12. Illingworth L., Reinfeld D. Vortex attractor for planar and non-planar surfaces, U. S. A. Patent 6.619.922, Sept. 16. 2003.
13. Gradeckij V. G. *Dinamicheskie processy v miniatyurnyh mobilnyh robotah s vakuumnym kontaktom k poverhnostyam peremeshcheniya* (The dynamics of miniature mobile robots with vacuum grippers), *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4, vol. 2, pp. 104–105 (in Russian).
14. Gradeckij V. G., Fomin L. F. *Dinamicheskie processy v sistemah sozdaniya vakuuma miniatyurnyh mobilnyh robotov* (The dynamics in vacuum grippers of miniature robots), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 9, pp. 10–14 (in Russian).
15. Camozzi official internet page, available at: www.camozzi.com
16. Tachkov A. A., Kalinichenko S. V., Malyhin A. Y. *Modelirovanie i ocenka ehffektivnosti sistemy uderzhanija malogabaritnogo avtonomnogo robota vertikalnogo peremeshcheniya s vakuumnymi zahvatami* (Simulation and evaluation of grasping efficiency for autonomous wall climbing robot with vacuum grippers), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, no. 3, pp. 178–186 (in Russian).
17. Gradeckij V. G., Knyazkov M. M., Fomin L. F., Chashchuhin V. G. *Mekhanika miniatyurnyh robotov* (The mechanics of miniature robots), Moscow, Nauka, 2010, 271 p. (in Russian).
18. Gradeckij V. G., Veshnikov V. B., Kalinichenko S. V., Kravchuk L. N. *Upravlyaemoe dvizhenie mobilnyh robotov po proizvolno orientirovannym v prostranstve poverhnostyam* (Motion control of mobile robots moving over different surfaces), Moscow, Nauka, 2001, 359 p. (in Russian).
19. Apostolescu T. C., Udrea C., Duminica D., Iorasco C., Bogato L., Laurentiu A. C. Development of a climbing robot with vacuum attachment cups, *Proceedings of International Conference MECHITECH'11*, September 22–23, 2011, Bucharest, pp. 258–267.
20. Watanabe M., Tsukagoshi H. Snail inspired climbing robot using fluid adhesion to travel on rough concrete walls and ceilings, *Advanced in cooperative robotics. Proceedings of CLAWAR-2016*, 12–14 September 2016, London, UK, pp. 79–87.
21. Yamaguchi T., Go T., Yamada Y., Nakamura T. Development of negative pressure suction mechanism in omnidirectional wall-climbing robot for inspection of airplanes, *Advanced in cooperative robotics. Proceedings of CLAWAR — 2016*, 12–14 September 2016, London, UK, pp. 106–114.
22. Semiduberskij M. S. *Nasosy, kompressory, ventilyatory* (Pumps, compressors, fans), Moscow, Vysshaya shkola, 1966, 262 p. (in Russian).

УДК 621.01

DOI: 0.17587/mau.18.452-458

Ф. Н. Притыкин, д-р техн. наук., доц., pritykin@mail.ru, В. И. Небритов, магистрант, vnebritov@gmail.com, Омский государственный технический университет, Омск

Виртуальное управление движением руки андроидного робота с использованием базы знаний при синтезе перемещений с учетом положения запретных зон

Предложена организация структуры базы знаний, необходимой при осуществлении интеллектуального управления движением механизма руки андроидного робота с учетом различного расположения известных запретных зон. Предлагаемая структура базы знаний характеризует прошлый опыт синтеза движений руки по вектору скоростей с учетом известных препятствий, а также задает ее собственные свойства. Представлены вычислительные эксперименты, связанные с виртуальным управлением движением руки андроидного робота при наличии известных запретных зон на основе использования разработанной базы знаний.

Ключевые слова: виртуальное моделирование движений роботов, запретные зоны, синтез движений роботов, база знаний, тупиковые ситуации, механизм манипулятора

Введение

При создании алгоритма управления андроидным роботом, автономно функционирующим в организованной среде, требуется учитывать множество факторов. Данный алгоритм управления реализуется в виде множества правил и соответствующего механизма логического выбора. При этом в заданные интервалы времени на протяжении всего процесса управления должны происходить соответствующие оценки определенных параметров. Данные параметры определяют условия, которые указан-

ный алгоритм должен понимать. Обычно алгоритм управления андроидным роботом сталкивается с незапланированными событиями и неизвестными ситуациями, и желательно, чтобы он разумно вел себя в этих ситуациях. Поведение автономно функционирующего андроидного робота может быть улучшено, если система управления станет учитывать и использовать базу знаний или прошлый опыт синтеза перемещений с учетом положения заранее известных запретных зон.

Рассмотрим методику формирования и структуру базы знаний о прошлом опыте, которая используется при виртуальном моделировании движений по вектору скоростей [1, 2]. Заметим, что виртуальное управление движением позволяет перед реализацией движений в приводах оценивать возможности механизма руки при заданном положении запретных зон и известных начальных и конечных точках синтезируемой траектории движения центра выходного звена (ВЗ) [3–7]. База знаний прошлого опыта представляет собой совокупность параметров, сгруппированных в массивы, определяющие собственные свойства механизма руки антропного робота, а также свойства, определенные с учетом положения известных запретных зон. Данные массивы могут быть вычислены заранее в целях определения прошлого опыта, связанного с синтезом движений по вектору скоростей. Синтез движений может быть исследован как в различных точках конфигурационного пространства (с определением угла сервиса на всем множестве возможных значений обобщенных координат реализацией мгновенных состояний [8, 9]), так и по определенно заданным траекториям выходного звена (руки) в рабочем пространстве с учетом положения препятствий, приводящих к тупиковым ситуациям [10].

Наиболее часто встречающейся двигательной задачей, выполняемой антропным роботом, является установка объектов манипулирования на стеллажи и снятие их со стеллажей. Поэтому исследуем структуру базы знаний при виртуальном управлении движением руки антропного робота на этом примере. Пусть необходимо смоделировать движение механизма руки, позволяющее перемещать объект манипулирования из точки A^H (начальная точка синтезируемой траектории) в точку A^K (конечная точка синтезируемой траектории) с учетом положения стеллажей P_1 и P_2 (рис. 1). Положение точек A^H и A^K на рис. 1 задано их проекциями A_1^H , A_2^H , A_1^K и A_2^K . На рис. 1 нижние индексы 1 или 2 соответственно обозначают принадлежность точек горизонтальной плоскости проекции (или виду сверху) или фронтальной плоскости проекции (или виду спереди). Общий вид и кинематическая схема исследуемого механизма руки антропного робота AR-600E представлены на рис. 2 [8]. При этом необходимо выяснить с помощью виртуального моделирования, может ли рука достичь целевой точки синтезируемой траектории или нет.

На рис. 1 система координат $O^1x^1y^1z^1$ связана с туловищем антропного робота, при этом параметры x_T , y_T и z_T определяют положение начала этой системы относительно

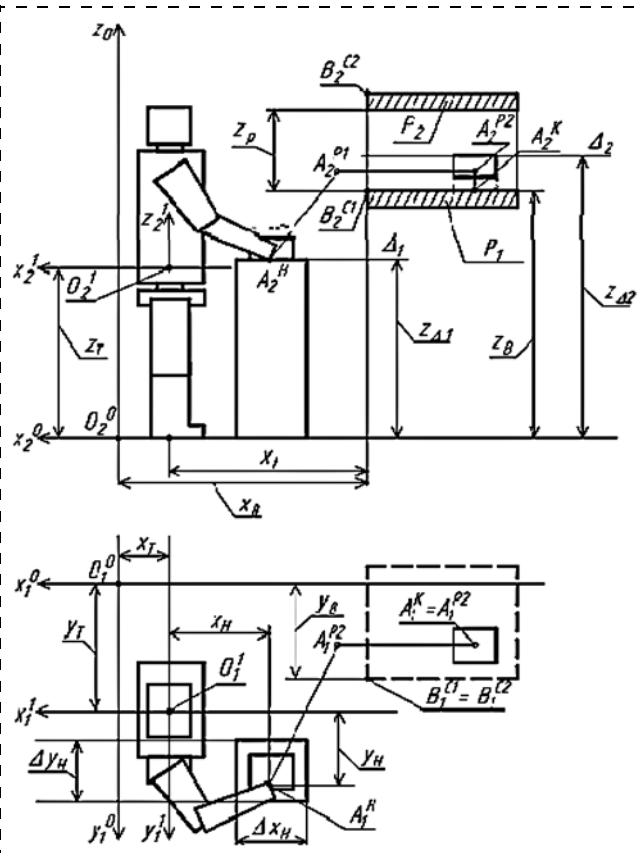


Рис. 1. Начальное и конечное положение объекта манипулирования при его установке на стеллажи антропным роботом

инерциальной системы координат $O^0x^0y^0z^0$. Параметр x_T определяет минимальное заданное безопасное расстояние от туловища антропного робота до стеллажей. Положение базовой точки B^{C1} нижнего стеллажа определяют координаты x_B , y_B и z_B . Решение задачи виртуального моделирования осуществим на основе использования базы знаний о прошлом опыте. На первом этапе решения двигательной задачи, связанной с переносом объекта

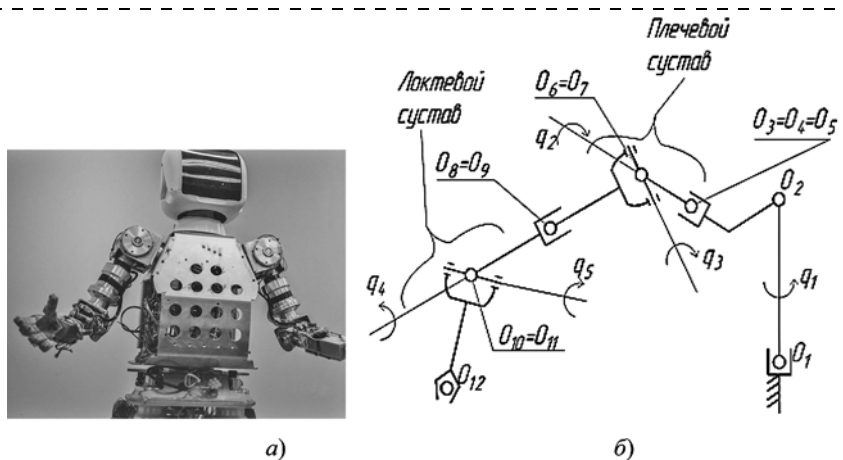


Рис. 2. Антропный робот AR-600E: а — общий вид антропного робота; б — кинематическая схема руки антропного робота

манипулирования из точки A'' в точку A^{P1} , а затем в точки A^{P2} и A^C , необходимо оценить рабочую зону с учетом положения стеллажей. При этом точка O^1 считается неподвижной. Построение рабочей зоны с учетом положения стеллажей исследовано в работе [11]. Параметры, определяющие проекции рабочей зоны с учетом положения стеллажей, могут быть использованы в качестве одной из составляющих базы знаний о прошлом опыте.

Условимся первую составляющую базы знаний использовать для вычисления наиболее оптимальной исходной позиции (конфигурации) руки андроида по отношению к объекту манипулирования (по отношению к начальной точке A'' заданной траектории). Наиболее оптимальная позиция при синтезе движений по вектору скоростей, характеризуемая параметрами x_H, y_H (см. рис. 1) и обобщенными координатами q_i , задает такое положение руки и туловища андроида относительно точки A'' , при котором телесный угол U_s , полученный реализацией мгновенных состояний, принимает максимальное значение [8]. Указанное положение андроида вычисляют для каждой отдельной исследуемой плоскости уровня Δ_i , заданной с определенным шагом координаты $z_{\Delta_1}, z_{\Delta_2}$ и т. п. (см. рис. 1), для которой строят график функции:

$$U_s = f(x_H, y_H). \quad (1)$$

Рассмотрим методику определения графика функции (1) для плоскости Δ_1 . Для определения графика функции (1) и множества конфигураций, при которых центр выходного звена совпадает с какими-либо точками A'' плоскости Δ_1 , заданными с определенным интервалом сетки, задается первоначальная точка $A_H^{\Delta_1}$. Параметры x_H и y_H определяют исходное положение начальной точки $A_H^{\Delta_1} \in \Delta_1$

траектории ВЗ в системе $O^1x^1y^1z^1$ при движении точки O_{12} (рис. 2, б) в плоскости Δ_1 (знак $\in$ определяет принадлежность точки геометрическому

объекту Δ_1). Положение указанной точки $A_H^{\Delta_1}$ на рис. 1 не изображено, оно совпадает с одной из вершин исследуемого прямоугольника плоскости Δ_1 , стороны которого определяют параметры Δx_H и Δy_H .

Множество положений точек $A'' \in \Delta_1$, построенных в заданном интервале Δx_H и Δy_H (см. рис. 1) на плоскости Δ_1 , получают синтезом движения руки по критерию минимизации объема движения [10].

Шаг указанной сетки для задания точек A'' определяется модулем вектора линейной скорости движения центра выходного звена в плоскости Δ_1 . При этом первоначальное принятое значение вектора $\mathbf{q}_{\Delta_i}(q_1, \dots, q_5)$, соответствующего положению центра

выходного звена в точке $A_H^{\Delta_1}$, обеспечивает максимальное значение угла U_s . Данное значение находится на основе исследования множества конфигураций руки, при которых обеспечены заданные значения параметров z_{Δ_1} и x_t . Из множества указанных конфигураций определяется конфигурация с максимальным значением угла U_s , полученным реализацией мгновенных состояний (3) [8].

Компоненты вектора $\mathbf{q}_{\Delta_i}$, или значения обобщенных координат $q_1, \dots, q_5$, задают указанную начальную конфигурацию, соответствующую положению центра выходного звена в точке $A_H^{\Delta_1}$. После синтеза движений для каждой точки A'' плоскости Δ_i , заданной с определенным шагом, считывают значение вектора $\mathbf{q}_{\Delta_i}$ и значения x_H и y_H . Телесный угол U_s , по-

лученный реализацией мгновенных состояний для различных точек A'' и значений вектора $\mathbf{q}_{\Delta_i}$, приближенно определяют по формуле

$$U_s = (U_s^{\text{гор}} + U_s^{\text{фр}} + U_s^{\text{проф}}) \cdot \frac{1}{3}, \quad (2)$$

где углы $U_s^{\text{гор}}$, $U_s^{\text{фр}}$ и $U_s^{\text{проф}}$ — задающие проекции угла U_s соответственно на горизонтальной, фронтальной и профильной плоскостях проекций [8]. График функции (1) для положения плоскости Δ_i , определяемого значением $z_{\Delta_1} = 1200$ мм,

представлен на рис. 3, а. На рис. 3, б представлена реализация мгновенных состояний при $\delta < 10$ мм для конфигурации, соответствующей положе-

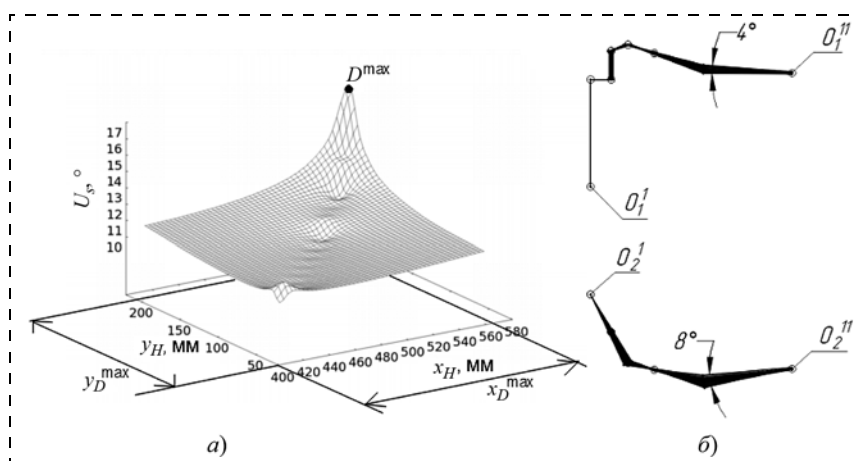


Рис. 3. Графики функций $U_s = f(x_H, y_H)$ и изображения телесных угловых для двух конфигураций при $\delta < 10$ мм:

а — $z_{\Delta_1} = 1200$ мм; б — реализация мгновенных состояний для точки, соответствующей $x_D^{\text{max}} = 564$ мм, $y_D^{\text{max}} = 207$ мм и $q_{\Delta_1}(119^\circ, 59^\circ, -54^\circ, 58^\circ, -27^\circ)$

нию центра захвата руки, принадлежащему плоскости Δ_i . В этой конфигурации обеспечено максимальное значение угла $U_s = 16^\circ$. Параметр δ задает точность позиционирования центра ВЗ.

На рис. 3, а точка $D^{\max}$ определяет конфигурации для плоскости уровня Δ_1 , в которой обеспечено максимальное значение параметра U_s , а следовательно, в данной конфигурации манипулятивность будет максимальной. Для $z_{\Delta_1} = 1200$ мм параметры $x_D^{\max}$ и $y_D^{\max}$ соответственно принимают значения $x_H = x_D^{\max} = 564$ мм, $y_H = y_D^{\max} = 207$ мм и $\mathbf{q}_{\Delta_1}$ $(119^\circ, 59^\circ, -54^\circ, 58^\circ, -27^\circ)$. Для $z_{\Delta_2} = 1300$ мм соответственно $x_H = x_D^{\max} = 562$ мм, $y_H = y_D^{\max} = 205$ мм и $\mathbf{q}_{\Delta_2}$ $(118^\circ, 61^\circ, -54^\circ, 59^\circ, -29^\circ)$. Первая составляющая базы знаний, заданная массивом Ψ_1 , задает соответствие значений z_{Δ_i} и параметров x_H , y_H и $\mathbf{q}_{\Delta_i}$. Эта база знаний используется для обеспечения оптимальной исходной позиции руки относительно начальной точки траектории перемещения объекта манипулирования. Данная составляющая базы знаний характеризует собственные свойства механизма руки антропного робота.

В качестве второй составляющей базы знаний Ψ_2 выступает информация о начальных и конечных положениях точек, задающих синтезируемую траекторию движения ВЗ и положениях запретных зон (стеллажей P_1 и P_2), при которых возникают тупиковые ситуации [2,10]. На рис. 4, а приведен пример положения запретных зон P_1 , P_2 и траектории движения руки антропного робота, при котором возникает тупиковая ситуация. На рис. 4, б показан синтез движений по траектории $A^H A^{P1} A^{P2}$ при заданной точности позиционирования $\delta < 10$ мм.

В этом случае возникает тупиковая ситуация. На рис. 6, б показан синтез движений по этой же траектории при $\delta < 60$ мм. Как видно из рис. 4, б, во втором случае происходит существенное отклонение от траектории, которое в общем случае может привести к столкновению объекта манипулирования со стеллажами. В этом случае при исходно заданном типе конфигурации синтез движений по вектору скоростей при $\delta < 60$ мм на участке траектории $A^{P1} A^{P2}$ невозможен. Следовательно, при обеспечении конфигурации в точке A^{P1} необходимо вначале осуществить движение руки от точки A^H к точке A^{P1} со сменой типа конфигурации при использовании значений весовых коэффициентов изменений обобщенных скоростей, не равных единице [12–14]. Тип конфигурации возможно также изменить синтезом малых движений, при котором центр выходного звена остается в заданной области, определяемой параметром $\delta < 10$ мм [9].

Использование третьей составляющей базы знаний Ψ_3 необходимо для сокращения времени расчета вектора обобщенных скоростей, когда расчетные промежуточные конфигурации пересекают запретные зоны P_1 и P_2 . Вектор обобщенных скоростей $\mathbf{Q}_N$ для этого случая получают из уравнения

$$\mathbf{Q}_N = \mathbf{Q}_M + \sum_{i=1}^p k_i m \mathbf{Q}_i, \quad (3)$$

где $\mathbf{Q}_M$ — вектор, задающий точку $M^Q \in \Gamma^Q$, соответствующую критерию минимизации объема движения [2, 10]. Верхний индекс Q обозначает принадлежность геометрического объекта пятимерному пространству обобщенных скоростей. Точка M^Q задает центр репера, связанного с p -плоскостью Γ^Q ; k_i — координаты точки N^Q в p -плоскости Γ^Q (каждой точке N^Q соответствует определенное мгновенное состояние механизма манипулятора); m — длина единичного отрезка репера p -плоскости Γ^Q , $\mathbf{Q}_i$ — единичные направляющие векторы осей репера; p — размерность p -плоскости Γ^Q . Для рассматриваемого примера $p = 2$.

Для вычисления предельных значений параметров $k_i^{\max}$ в зависимости (3) для различных конфигураций руки используется база знаний Ψ_3 . Массив параметров Ψ_3 определяет значения коэффициентов a_j^{kl} уравнений гиперповерхностей, отражающих функции $k_i^{\max} = f(q_3, q_4, q_5)$ в заданных предельных интервалах значений обобщенных координат q_1 и q_2 [8]. Параметры $k_i^{\max}$ позволяют определять области в пространстве обобщенных скоростей, задающие допустимые значения вектора $\mathbf{Q}_N$, при которых обеспечена требуемая точность позиционирования $\delta < 10$ мм центра ВЗ.

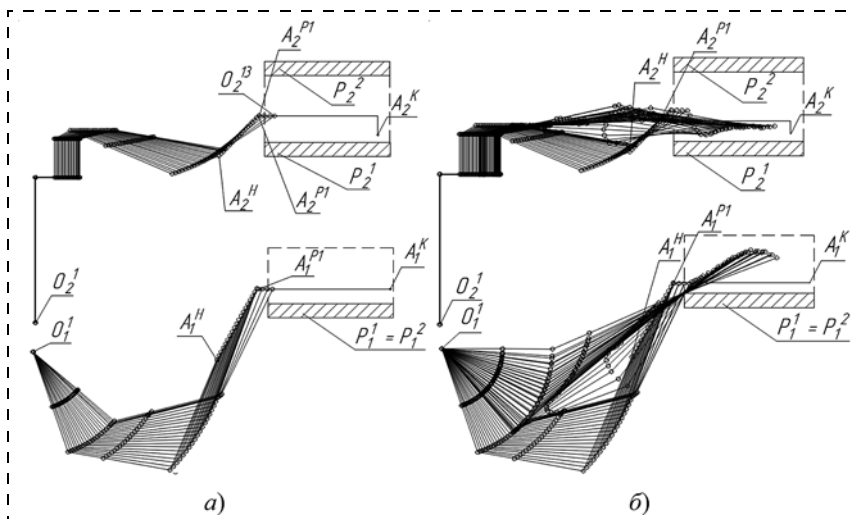


Рис. 4. Синтез движений по траектории, заданной отрезками $A^H A^{P1}$ и $A^{P1} A^{P2}$: а — с возникновением тупиковой ситуации при $\delta < 10$ мм; б — синтез движений при $\delta < 60$ мм

Результат синтеза движения с использованием базы знаний

Схема алгоритма синтеза траектории движения руки антропного робота на основе использования разработанной базы знаний представлена на рис. 5, где приняты следующие обозначения: 1 — ввод данных массивов l_i , smi , Kod и переменных $n_k = 0$, $A^H(x^H, y^H)$, $A^K(x^K, y^K)$, $B^{C1}(x_{BC1}, y_{BC1})$, $B^{C2}(x_{BC2}, y_{BC2})$ и X_r , где l_i — длины звеньев механизма, smi — смещения вдоль осей координат, Kod — коды преобразований систем координат [8]. Параметры l_i , smi , Kod определяют геометрическую модель кинематической цепи механизма руки антропного робота; ввод данных массивов Ψ_1 , Ψ_2 и Ψ_3 , задающих базу знаний прошлого опыта; 2 — вычисление промежуточных точек A^{P1} и A^{P2} , задающих положение синтезируемой траектории движения точки центра ВЗ, при которых обеспечено отсутствие пересече-

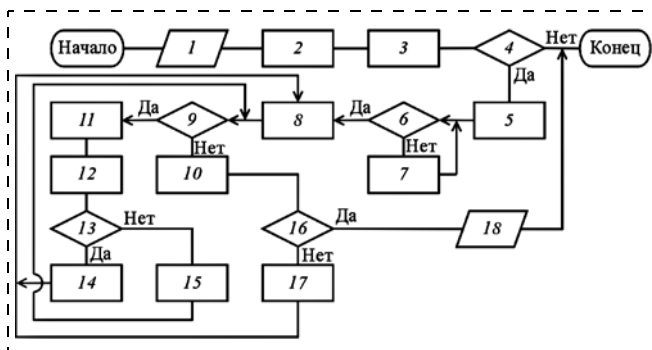


Рис. 5. Схема алгоритма виртуального моделирования движения руки антропного робота на основе использования базы знаний

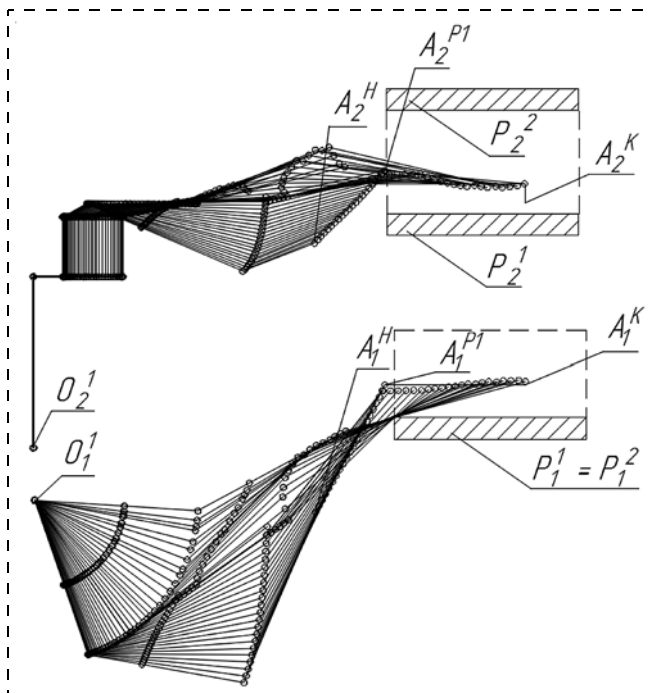


Рис. 6. Результат синтеза движения до конечной точки синтезируемой траектории

ния траектории и запретных зон P_1 и P_2 (обеспечение минимального удаления l_8 до запретных зон); 3 — определение параметров, задающих графические образы проекции рабочей зоны λ_i^0 руки на основе известных координат точек B^{C1} , B^{C2} [11]; 4 — определение принадлежности точек A^H , A^{P1} , A^{P2} и A^K рабочей зоне [11]; 5 — вычисление вектора $q_{\Delta 1}$ и значений x_H , y_H , задающих оптимальную исходную позицию руки и туловища антропного робота (при $U_s = \max$) относительно объекта манипулирования на основе параметра $z_{\Delta i}$ и массива Ψ_1 (анализ прошлого опыта, заданного массивом Ψ_1); 6 — анализ соответствия значений $q_{\Delta 1}$, координат точек A^H , A^{P1} , A^{P2} , A^K , B^{C1} , B^{C2} значениям массива Ψ_2 , задающего тупиковые ситуации [12–14] (анализ прошлого опыта, заданного массивом Ψ_2); 7 — осуществление синтеза движения в целях изменения типа конфигураций и определение нового значения q [9]; 8 — вычисление вектора обобщенных скоростей $Q_M(\dot{q}_{1M}, \dot{q}_{2M}, \dots, \dot{q}_{iM})$ на основе критерия минимизации объема движения при синтезе движений на участках траекторий, заданных отрезками $A^H A^{P1}$, $A^{P1} A^{P2}$ и $A^{P2} A^K$ [2, 10]; 9 — определение условия пересечения конфигурации руки, определяемой значениями $q_i = q_i + \dot{q}_{iM}$ и запретных зон (при этом принято допущение $\Delta q_i \approx \dot{q}_{iM}$), $\dot{q}_{iM}$ — компоненты вектора Q_M ; 10 — построение следующей конфигурации $q_i = q_i + \dot{q}_{iM}$ или $q_i = q_i + \dot{q}_{iN}$; 11 — определение максимальных значений $k_i^{\max}$ на основе q_i и массива Ψ_3 (анализ прошлого опыта Ψ_3) [8]; 12 — изменение значений $k_i = k_i + 1$, используемых в векторном уравнении (3); 13 — значения k_i удовлетворяют максимальным значениям $k_i^{\max}$; 14 — синтез движений при неизменном положении центра ВЗ. Движение руки в целях изменения типа конфигурации [9]; 15 — вычисление вектора обобщенных скоростей $Q_M(\dot{q}_{1N}, \dot{q}_{2N}, \dots, \dot{q}_{iN})$ (3) [8]; 16 — целевая точка на заданном отрезке достигнута; 17 — изменение значения номера следующей конфигурации $n_k = n_k + 1$; 18 — вывод результатов синтеза движения на всем участке заданной траектории, определяемой отрезками $A^H A^{P1}$, $A^{P1} A^{P2}$ и $A^{P2} A^K$.

На рис. 6 приведены результаты синтеза движений с использованием базы знаний в целях перемещения объекта манипулирования из точки A^H в точку A^K . Синтез движений со сменой типа конфигурации с использованием весовых коэффициентов значений обобщенных скоростей на этом рисунке представлен на участке траектории, заданной точками $A^H A^{P1}$.

Заключение

Разработанный алгоритм виртуального управления движением андроидного робота на основе использования разработанной базы знаний позволяет выполнить комплексную оценку текущих ситуаций и на основе этого осуществить реализацию наиболее оптимального логического выбора. При этом выборе происходит минимальное суммарное изменение обобщенных координат.

Результаты вычислительных экспериментов показывают сокращение на порядок времени расчета тестовых заданий, связанных с постановкой объектов манипулирования на стеллажи и снятием их со стеллажей при использовании разработанной базы знаний. При этом значительно сокращается число случаев синтеза движений с возникновением тупиковых ситуаций. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем управления, автономно функционирующих андроидных роботов в заранее известной окружающей среде.

Список литературы

1. **Wightney D. E.** The mathematics of coordinated control of prosthetic Arms and Manipulators // *Trans. ASME, Ser G, J Dynamic, Just, Meas and Control*. 1972. Vol. 94, N. 4. P. 19–27.
2. **Кобринский, А. А., Кобринский А. Е.** Манипуляционные системы роботов. М.: Наука, 1985. 343 с.
3. **Pratt J., Dilworth P., Pratt G.** Virtual model control of a bipedal walking robot // *Proceedings of Int. Conf. on Robotics and Automation*. 1997. Vol. 1. P. 193–198.

4. **You B., Zou Y., Xiao W., Wang J.** Telerobot control system based on dual-virtual model and virtual force // *Int. Forum on Strategic Technology*. 2010. P. 246–250.

5. **Hrr J., Pratt J., Chew C.-M., Herr H., Pratt G.** Adaptive virtual model control of a bipedal walking robot // *Proceedings of Int. Joint Symp. on Intelligence and Systems*. 1998. P. 245–251.

6. **Tsukamoto H. K., Takubo T., Ohara K., Mae Y., Arai T.** Virtual impedance model for obstacle avoidance in a limb mechanism robot // *Int. Conf. on Information and Automation*. 2010. P. 729–734.

7. **Hasegawa T., Suehiro T., Takase K.** A model-based manipulation system with skill-based execution // *IEEE Trans. Rob. and Autom.* 1992. N. 5. P. 535–544.

8. **Притыкин Ф. Н., Небритов В. И.** Исследование размеров и формы области в многомерном пространстве обобщенных скоростей, задающей допустимые мгновенные состояния механизма андроидного робота // *Омский научный вестник*. 2016. № 5. С. 29–34.

9. **Pritykin F., Gordeev O.** Defining a Service Angle for Planar Mechanisms of Manipulators based on the Instantaneous States Analysis // *MEACS2015 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 124 (2016) 012025. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012025. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/124/1/012025>

10. **Pritykin F. N., Tevlin A. M.** Procedure for construction of manipulator motions from a given local grip path in the presence of obstacles. *Soviet machine science*. Allerton press ins. New York, 1987. N. 4. P. 30–33.

11. **Притыкин Ф. Н., Небритов В. И.** Построение рабочей зоны механизма руки андроидного робота с учетом положения запретных зон // *Омский научный вестник*. 2017. № 1. С. 5–9.

12. **Галечан В. К., Саламандра Б. Л.** К построению алгоритма работы манипулятора в среде с препятствиями // *Машиноведение*. 1984. № 2. С. 40–47.

13. **Корендасев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И.** Манипуляционные системы роботов. М.: Машиностроение, 1989. 472 с.

14. **Зенкевич С. Л., Ющенко А. С.** Управление роботами. Основы управления манипуляционными робототехническими системами. М: Изд. МВТУ, 2000. 400 с.

Virtual Motion Control of an Android Robot Hand Using a Knowledge Base During Synthesis of Movements with Account of the Positions of the Exclusion Zones

F. N. Pritykin, pritykin@mail.ru✉, **V. I. Nebritov**, vnebritov@gmail.com
Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russian Federation

Corresponding author: **Pritykin Fedor N.**, D. Sc.,
Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russian Federation,
e-mail: pritykin@mail.ru

Received on December 30, 2016

Accepted on January 20, 2017

The article presents organization of a knowledge base required for implementation of the intelligent control of the movement of an android robot hand with account of the positions of the exclusion zones. The proposed structure of the knowledge base characterizes the previous experience of the synthesis of the hand movements by the velocity vector with account of the known obstacles, and sets the properties intrinsic to them. The knowledge base consists of four components. The first one specifies the images, which represent a projection of the contours of the working areas of the mechanism, taking into account the exclusion zones. The second one stores configurations with the maximal values of the parameters, which define the solid angle, used to calculate the most optimal initial set position with respect to an object of manipulation. The third one contains configurations of the movement, from which a deadlock situation results. The fourth one sets the maximal values of $k_i^{\max}$ parameters. The fourth component of the knowledge is necessary to reduce the time of calculation of the vector of the generalized velocities, when the calculated configuration crosses the exclusion zone. The algorithm of the virtual motion control of a robot android organized on the knowledge base allows us to implement the methods for evaluation of the current situation and make respectively one or another logical choice. The results of the computational experiments show a reduction of time for calculation of the test tasks associated with setting and removal of the manipulation objects on the shelves and racks with the use of the developed knowledge base.

Keywords: virtual model operation of the robots' movements, exclusion zones, synthesis of the robots' movements, knowledge base, impasses, manipulator mechanism

For citation:

Pritykin F. N., Nebritov V. I. Virtual Motion Control of an Android Robot Hand Using a Knowledge Base During Synthesis of Movements with Account of the Positions of the Exclusion Zones, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 452–458.

DOI: 10.17587/mau.18.452-458

References

1. **Wihtney D. E.** The mathematics of coordinated control of prosthetic Arms and Manipulators, *Tpons. ASME, Ser G, J Dymamic, Just, Meas and Control*, 1972, vol. 94, no 4, pp. 19–27.
2. **Kobriniskij A. A., Kobriniskij A. E.** Manipulacionnye sistemy robotov (Manipulation of robots), Moscow, Nauka, 1985, 343 pp. (in Russian).
3. **Pratt J., Dilworth P., Pratt G.** Virtual model control of a bipedal walking robot, *Proceedings of Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1997, vol. 1, pp. 193–198.
4. **You B., Zou Y., Xiao W., Wang J.** Telerobot control system based on dual-virtual model and virtual force, *Int. Forum on Strategic Technology*, 2010, pp. 246–250.
5. **Hrr J., Pratt J., Chew C.-M., Herr H., Pratt G.** Adaptive virtual model control of a bipedal walking robot, *Proceedings of Int. Joint Symp. on Intelligence and Systems*, 1998, pp. 245–251.
6. **Tsukamoto H. K., Takubo T., Ohara K., Mae Y., Arai T.** Virtual impedance model for obstacle avoidance in a limb mechanism robot, *Int. Conf. on Information and Automation*, 2010, pp. 729–734.
7. **Hasegawa T., Suehiro T., Takase K.** A model-based manipulation system with skill-based execution, *IEEE Trans. Rob. and Autom.*, 1992, no. 5, pp. 535–544.

8. **Pritykin F. N., Nebritov V. I.** Issledovanie razmerov i formy oblasti v mnogomernom prostranstve obobshhjonnyh skorostej, zadajushhej dopustimye mgnovennye sostojanija mehanizma androidnogo robota (The study of size and shape of the area in the multidimensional space of generalized velocities defining permissible instantaneous state of android robot mechanism), *Omskij nauchnyj vestnik*, 2016, no. 5, pp. 29–34 (in Russian).

9. **Pritykin F., Gordeev O.** Defining a Service Angle for Planar Mechanisms of Manipulators based on the Instantaneous States Analysis, *MEACS2015 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 124 (2016) 012025, doi:10.1088/1757-899X/124/1/012025, available at <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/124/1/012025>

10. **Pritykin F. N., Tevlin A. M.** Procedure for construction of manipulator motions from a given local grip path in the presence of obstacles. Soviet machine science, Allerton press ins. New York, 1987, no. 4, pp. 30–33.

11. **Pritykin F. N., Nebritov V. I.** Creation of a working zone of the mechanism of a hand of the androidny robot taking into account the provision of prohibited zones, *Omskij nauchnyj vestnik*, 2017, no. 1, pp. 5–9 (in Russian).

12. **Galechan V. K., Salamandra B. L.** K postroeniju algoritma roboty manipulyatora v srede s prepyatstvijami (Construction of the algorithm of the paddle in an environment with obstacles), *Mashinovedenie*, 1984, no. 2, pp. 40–47 (in Russian).

13. **Korendjasev A. I., Salamandra B. L., Tyves L. I.** Manipulacionnye sistemy robotov (Manipulation of robots), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 472 p. (in Russian).

14. **Zenkevich S. L., Yushchenko A. S.** Control of robots. Bases of management of handling robotic systems, Moscow, Publishing house of, MVTU, 2000, 400 p. (in Russian).

УДК: 004.896:629.78

DOI: 0.17587/mau.18.458-468

С. Э. Чернакова, науч. сотр., s_chernakova@rambler.ru,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО,

Л. А. Станкевич, канд. техн. наук, проф., stankevich_lev@inbox.ru,

С. В. Хлопин, канд. техн. наук, доц., hlserg@mail.ru,

Институт компьютерных наук и технологий

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого,

А. И. Нечаев, нач. отдела, a_nechaev@rambler.ru,

ОАО "Научно-испытательный институт эргатических систем", Московская область, г. Жуковский

Взаимодействие оператора и роботов при обучении показом и телеуправлении гетерогенными робототехническими системами на основе модели формы движения¹

Рассматриваются задачи взаимодействия оператора и роботов, обучения и телеуправления группой различных по функциональному назначению (гетерогенных) роботов. Используется обучение показом, обеспечивающее распознавание формы естественных движений человека-оператора. Приводятся результаты экспериментальных исследований по коррекции сценариев поведения команды роботов. Предложенные подходы к обучению и телеуправлению предполагается использовать для роботов-ассистентов и антропоморфных сервисных роботов, в том числе работающих в группе.

Ключевые слова: робот, групповое управление, коррекция сценариев, реконфигурация, обучение показом, телеуправление, гетерогенные роботы

Введение

В настоящее время большой интерес вызывает задача управления автономными роботами и бес-

пилотными аппаратами в спасательных, военных или космических миссиях, а также промышленными и сервисными роботами, выполняющими различные задачи индивидуально и в группе, в том числе при непосредственном взаимодействии с человеком.

Также известны компьютерные моделирующие комплексы, игровые программы с виртуальными

¹ Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (Проект 16-08-01277-а) и Программы ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 гг. (0073-2015-0003).

роботами, которые могут рассматриваться как роботы-агенты, решающие совместно индустриальные, экономические и социальные задачи, или агенты-игроки, участвующие в виртуальных командных играх роботов.

Взаимодействие операторов и роботов, работающих в группе, возможно на индивидуальном и групповом уровнях. На индивидуальном уровне взаимодействие оператора и робота реализуется первоначально в процессе обучения, при котором оператор формирует сообщение, состоящее из инструкции (команды) для робота и описания формы рабочего движения.

Контроль и коррекция оператором хода выполнения команды и рабочих движений роботом может выполняться с использованием канала видеонаблюдения и приема ответного сообщения от робота о выполнении данной команды или рабочего движения в процессе телеуправления.

На групповом уровне оператор в процессе обучения может определить (назначить) стратегию (тип группового поведения и распределение функций роботов) и тактику (пути и последовательности реализации сценариев). В процессе телеуправления оператор должен оценивать качество реализации и при необходимости корректировать поведение группы роботов.

Опыт эксплуатации систем телеуправления роботами, накопленный авторами, позволяет сделать следующий вывод: чем естественней для человека общение с роботом, тем эффективнее и надежнее будут использоваться роботы в реальной миссии, в том числе в заранее непредсказуемых условиях.

Предполагается, что при взаимодействии оператора и роботов в процессе проведения миссии с использованием группы различных по конструкции и функциональному назначению (гетерогенных) роботов необходимо решать следующие задачи:

- обучение каждого робота необходимым для выполнения миссии индивидуальным навыкам и рабочим движениям;
- обучение групповому поведению и возможности реконфигурации группы;
- контроль (тестирование) достоверности результатов обучения;
- телеуправление с возможностью коррекции миссии и сценариев в режиме реального времени.

В данной статье рассматриваются принципы и методы взаимодействия операторов и роботов в целях их обучения и телеуправления при функционировании индивидуально и в группе.

Ниже рассмотрены принципы взаимодействия операторов с роботами, основанные на использовании модели формы движения (МФД), в процессе обучения роботов показом рабочих движений и сценариев поведения, а также в процессе телеуправления групповым поведением роботов.

Экспериментально были исследованы процедуры обучения и телеуправления на примере команды роботов-футболистов типа *NAO*. Показана воз-

можность коррекции типовых движений в режиме реального времени при телеуправлении группами разных по функциональному назначению (гетерогенных) роботов.

Обзор основных космических проектов телеуправления роботами

В 1993 г. в проекте *ROTEX (DLR)* впервые были опробованы в космосе методы телеуправления с Земли очувствленным роботом-манипулятором [1–3]. Была предложена и реализована информационная технология телесенсорного программирования для обучения и последующего телеуправления космическими манипуляторами.

По проекту 1992р *ESA* в СПИИРАН в 2001–2003 гг. был разработан и изготовлен стендовый комплекс отработки информационных технологий обучения и телеуправления космическими роботами [4, 5] с использованием роботов-манипуляторов, макета фрагмента космической станции и компьютерных моделей.

В России реализован международный космический эксперимент *Контур-2* [6] по телеуправлению наземными роботами, выполняемому космонавтами, находящимися на борту МКС, с использованием двухкоординатной рукоятки с отражением усилий.

В рамках подготовки проекта *METERON* и лунных миссий специалисты *NASA* провели эксперимент, в ходе которого астронавты с борта МКС управляли роботом, который работал на полигоне в Калифорнии [7–9].

Надо отметить, что полигон, где двигался робот, имитировал лунную поверхность. Это не случайно — данную технологию управления планируется использовать прежде всего для исследования Луны, а также Марса и других планет.

Как известно, в течение длительного времени три марсохода США успешно работают на поверхности Марса [10]. Выполняется программный автоматический обход препятствий и пооперационное планирование и воспроизведение движений, которые команда экспертов ЦУП готовит заранее с ожиданием (остановкой) движения "марсоходов" при нештатных ситуациях.

Осуществляется визуальный и сенсорный контроль операций и движения. Манипуляторы успешно выполняют функции по сбору и анализу физико-химического состава образцов, дополняют возможности наблюдения и обследования объектов телекамерами.

Однако в указанных работах не реализовано силовомоментное телеуправление рабочими операциями космического или наземного робота. Актуальная проблема телеуправления при задержках времени более 0,5 с до настоящего времени не решена.

Не проводилось обучение роботов естественным для человека методом показа рабочих движе-

ний или сценариев выполнения операций, в том числе при телеуправлении группой роботов.

Сложные технологические и сборочные операции в космосе роботами не выполняются, оперативное телеуправление сменой сценариев и последовательности рабочих операций не предусмотрено.

По заказу NASA фирма *General Motors* разработала андроидный робот *Робонавт-2*, который в настоящее время находится внутри МКС [11]. Управление роботом *Робонавт-2* осуществляется астронавтами с пульта дистанционного управления, соединенного кабелем с системой управления роботом, размещенной на базовой платформе.

Проект андроидного робота *Justin (DLR)* [12] предусматривает копирующее телеуправление в основном с помощью экзоскелетона. Используется силомоментное очувствление и управление с обратной связью по силе и моменту. Реализовано так называемое податливое управление взаимодействием робота с человеком и предметами внешней среды.

Аналогичные российские проекты космических роботов *SAR-400* (ЦНИИМаш) [13] и *Косморобот* (РКК "Энергия") [14], выполняемые в настоящее время по заказу Роскосмоса, также предусматривают непосредственное управление космонавтами от дистанционного пульта или экзоскелетона.

Опытный образец робота *SAR-400* смог выполнить в условиях стенда около 50 типовых операций, моделирующих работу космонавта в открытом космосе: открытие/закрытие выходного люка, перемещение по поручням, осмотр и инспекцию поверхности станции, замену оборудования, операции с научной аппаратурой и специальным инструментом. Аналогичные операции под контролем космонавтов планируется выполнять и с помощью *Косморобота* при осуществлении внекорабельной деятельности (ВнеКД) на МКС.

Робот должен выполнить заданное движение в условиях возможных ошибок сенсоров и неточности описания компьютерной модели внешней среды. Проверяется возможность автоматической коррекции движений робота с использованием специальной моделирующей среды.

В нашей разработке, представленной в данной статье, в отличие от использования экзоскелета оператор получает возможность естественного обучения рабочим движениям, не учитывая особенности кинематики и динамики робота.

Предложенная фрейм-структурированная система представления рабочих движений, сценариев реализации операций и группового поведения позволяет осуществлять достоверный контроль знаний робота и оперативно корректировать поведение группы роботов при надежном и гарантированном выполнении миссий на основе прогноза развития ситуации в сложных условиях применения.

Принципы взаимодействия оператора и роботов

В плане индивидуального взаимодействия человека и робота наиболее интересным является взаимодействие с антропоморфным или гуманоидным роботом. Гуманоидные роботы являются мобильными роботами нового класса, имеющими не только антропоморфную форму, но и человекоподобное поведение. Эти роботы должны быть способны целенаправленно действовать в динамической неструктурированной среде и взаимодействовать с человеком, который может не иметь навыков управления роботами.

Поэтому разработка дружественного естественного интерфейса взаимодействия человека с такими роботами является одной из главных задач для эффективного, безопасного и надежного взаимодействия в реальных динамических условиях применения.

В настоящее время ведутся интенсивные разработки такого интерфейса на базе перспективных мультимедиа технологий, позволяющих роботу распознавать и "понимать" жесты, рабочие движения и мимику человека, распознавать голосовые команды и естественные движения (позы) "хозяина".

В плане группового взаимодействия особенно интересной и плохо изученной проблемой является взаимодействие человека и группы роботов при выполнении совместной (командной) работы, требующей выработки и согласования общих намерений и поведения у всех членов команды (людей и роботов) на пути к достижению общей цели.

В данной статье представлены методы обучения и телеуправления группой роботов с использованием команды реальных роботов-футболистов и специальной виртуальной игровой среды для отработки основных принципов взаимодействия человека и роботов в команде.

Такая реальная команда роботов и виртуальная игровая среда могут быть универсальным средством для моделирования и исследования взаимодействий оператора и группы роботов, имеющих сложное коллективное и индивидуальное поведение.

Разработанная авторами трехмерная среда виртуального футбола и баскетбола дает возможность оперативно управлять стратегией и тактикой командной работы роботов. Визуализация игры на мониторе компьютера оператора позволяет ему контролировать поведение роботов как агентов команды. Использование соревновательной среды позволяет исследовать разные стратегии и тактики командной работы и выбирать лучшие из них.

Такое сочетание реальной группы роботов и виртуальной игровой среды может использоваться не только для исследований методов обучения, но и для моделирования процессов телеуправления реальными роботами (беспилотными аппаратами) из центров группового управления, например, для эффективного выполнения сервисных, медицинских, транспортных и других задач.

В нашем случае для моделирования группового взаимодействия (оператор — робот) используются игровые 3D-среды футбола или баскетбола. Например, в работе [15] описан 3D-вариант среды симуляции баскетбола роботов-агентов, названный *RoboNBA* (*National Basketball Association*). В этой среде, а также в среде футбола роботов *Robocup Soccer* авторами данной работы было проведено моделирование стратегии и тактики взаимодействий автономных интеллектуальных роботов-агентов между собой и с человеком [16].

В системах группового (командного) управления оператор может ввести инструкции по изменению стратегии и тактики командной работы реальных роботов через терминальный компьютер, в котором должна находиться специальная программа агента-супервизора, имеющего доступ к виртуальной игровой среде моделирования и каналам связи с группой реальных роботов.

Виртуальная игровая среда моделирования представляет собой сервер и группу интеллектуальных агентов, моделирующих роботов. Такая среда является многоагентной по определению. Структура системы взаимодействия оператор — группа роботов-агентов представлена на рис. 1.

Мультиагентный подход в последнее время все чаще применяется для организации совместного решения сложных задач группой взаимодействующих агентов [17]. Развитие такого подхода привело к разработке мультиагентной технологии, которая позволяет реализовать мощные открытые распределенные робототехнические системы на базе автономных роботов-агентов, взаимодействующих друг с другом. Для того чтобы действия таких роботов были подобными человеческим, они должны иметь интеллектуальные или когнитивные системы управления [18, 19].

В многоагентных игровых средах агенты моделируют роботов, и они реализуются как автономные интеллектуальные агенты с добавленными функциями координации действий в группе. Каждый

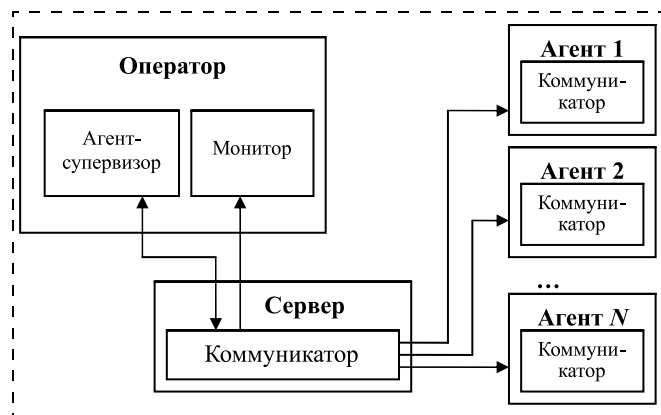


Рис. 1. Схема виртуальной среды для организации взаимодействия оператора и группы роботов

агент реализует набор функций, которые обеспечивают индивидуальное и коллективное поведение роботов. Агенты в модельной среде строятся на основе слоистой реактивной архитектуры, позволяющей реализовать поведение роботов, подобное человеческому.

Наиболее сложные роботы-агенты строятся как когнитивные, т.е. способные к автоматическому накоплению знаний в процессе функционирования и рациональному принятию решений на основе ментального вывода [20, 21].

Взаимодействие роботов-агентов определяется их верхним уровнем коллективного поведения. При этом должны использоваться специальные функции, которые реализуют механизмы координированного поведения. Они обеспечивают способность роботов-агентов кооперироваться или соревноваться при выполнении целенаправленных действий.

Модель формы движения

Основной подход к моделированию формы движений в процессе обучения роботов изложен в работах [22—24]. Авторами данной статьи предложено использовать модели формы движений (МФД), основанные на системе фреймов М. Минского [25], для хранения формы рабочих движений, а также сценариев поведения в виде семантико-топологической системы фреймов.

Основной особенностью разработанной МФД является сочетание семантического моделирования различных объектов (и движений как объектов) с моделированием топологических отношений между объектами и классами объектов внешней среды (ВС) [26].

Язык описания, используемый в МФД, представляет собой многоуровневую иерархическую систему фреймов, содержащих одновременно семантическое описание элементов формы и топологические (метрические) характеристики, а также методы и процедуры, характерные для выполнения различного типа движений и сценариев поведения.

МФД оперирует со множеством объектов (понятий) $\{B\}$, под которыми понимаются как отдельные движения, так и фрагменты траекторий сложного движения или последовательности действий (рабочего сценария).

Множества отношений $\{R\}$ между объектами подразделяются на логические (семантические) $\{R_S\}$ и топологические (метрические) $\{R_T\}$ (такие как: разделены, внутри, прикасаются, равны, покрывает, перекрывает).

Объекты МФД могут быть объединены в классы $\{K_B\}$, отношения на уровне классов можно также разделить на семантические $\{R_S^k\}$ (наследования, включения и др.) и топологические отношения $\{R_T^k\}$ (локальные, связанные, многозвенные и т.п.).

Совокупность указанных отношений можно представить следующим образом:

$$\{R\} = \langle \{R_S\}, \{R_T\}, \{R_S^k\}, \{R_T^k\} \rangle.$$

В общем виде фрейм-структурированное описание МФД может быть представлено следующим образом:

$$\text{МФД} = \langle \{B\}, \{K_B\}, \{R\}, \{T\}, \{M_B\} \rangle,$$

где $\{B\}$ — множество объектов = движений (рабочих сценариев); $\{K_B\}$ — множество классов объектов = движений и сценариев; $\{R\}$ — множество отношений объектов = движений и их классов; $\{T\}$ — множество задач, решаемых с использованием движений; $\{M_B\}$ — множество методов применения объектов.

Семантика объекта МФД (фрейма движения) определяется как совокупность имени, полей, атрибутов и методов. Будем считать, что класс K_B порождает название или имя фрейма движения, а поле семантических параметров F_S определяет основные отличительные признаки движения.

Для связи фрейма объекта с типовым методом использования движения M_B вводится понятие "атрибут метода" A_M . Таких атрибутов метода A_M может быть несколько для различных задач из множества $\{T\}$, в которых используется данное движение — объект B .

Для структуризации иерархической системы фреймов, т.е. организации перекрестных связей фреймов различных уровней между собой, вводятся понятия "атрибут предка" A_F и "атрибут потомка" A_C .

Для организации параллельных связей фреймов различных классов объектов МФД может быть организована горизонтальная связь в виде "атрибут соседей" A_N .

Таким образом, семантическое описание объекта МФД (B_S), формируемого и запоминаемого при обучении в виде фрейма, может выглядеть следующим образом:

$$B_S = \langle N_B, F_S, A_S, \text{Sign}_B \rangle,$$

где B_S — семантическое описание объекта МФД; N_B — имя объекта; F_S — поле семантических параметров; $A_S = \langle \{A_M\}, \{A_F\}, \{A_C\}, \{A_N\} \rangle$; Sign_B — условное обозначение объекта.

Для представления классов МФД может быть использовано, по аналогии, следующее описание:

$$K_B = \langle N_K, F_K, A_K, \text{Sign}_K \rangle,$$

где K_B — описание класса объектов МФД; N_K — название класса объектов; F_K — поле признаков класса объектов; $A_K = \langle \{A_M^K\}, \{A_F^K\}, \{A_C^K\}, \{A_N^K\} \rangle$; Sign_K — символическое обозначение класса.

Топологическое описание (конфигурация) движения (B_T) также запоминается в МФД в виде сис-

темы фреймов при обучении показом и может быть представлено следующим образом:

$$B_T = \langle N_B, F_T, A_T, Ex_B \rangle,$$

где B_T — топологическое описание объекта МФД; N_B — имя объекта (движения или рабочего сценария); F_T — поле геометрических (метрических) параметров; A_T — атрибуты конфигурации траектории движения (схемы сценария); Ex_B — геометрическая модель, образное представление движения.

Воспроизведение движения (рабочего сценария) роботом после обучения показом выполняется на основе множества типовых движений (фрагментов сценария), форма которых была сохранена в виде системы фреймов МФД.

Особенность воспроизведения движения (рабочих сценариев) в реальной ВС заключается в том, что фрагменты движений, которым обучен робот (рабочих операций), могут быть использованы в разных последовательностях в зависимости от внешних условий.

Число элементарных движений (рабочих операций), запоминаемых в МФД при обучении, возрастает при увеличении объема задач, решаемых роботом, однако этот рост будет несоизмеримо меньше, чем возрастание числа сценариев и вариантов поведения (миссий), для выполнения которых используется робот.

В этом заключается одно из существенных преимуществ предложенной семантико-топологической модели формы движений.

Эффективность предложенных методов обучения подтверждена результатами компьютерного моделирования и экспериментов с роботами-манипуляторами [27, 28].

При этом человек не надевает на себя экзоскелет, ему важно надежно передать свой опыт (навыки) и достоверно проверить качество и достоверность этих знаний, полученных в процессе обучения системой управления роботом, различных по конструкции и функциональному назначению [29, 30].

Обучение робота показом движения

Обучение показом движений может рассматриваться как передача знаний о моторных, сенсорных и поведенческих навыках от человека-оператора к роботу для реализации надежного, безопасного и эффективного поведения робота на основе адекватного восприятия действий человека-оператора.

При обучении может использоваться телекамера робота, которая "наблюдает" движение руки (или головы) человека (рис. 2). При этом системой управления робота определяются пространственные координаты движения человека и выполняется распознавание формы траектории обучаемого движения.

Необходимо отметить, что во время распознавания движений человека у робота формируется опыт движений с сохранением одновременно мет-

рической и семантической информации, содержащейся в данных, получаемых от сенсоров (в данном случае — телекамеры).

Отличительной чертой предложенных методов обучения является естественность представления и передачи знаний о движении от человека к роботу, которая, в свою очередь, обеспечивает:

- свободу движений человека без ограничений, связанных с какими-либо техническими приспособлениями (рукоятками и экзоскелетами);
- максимальное использование интуитивного опыта и профессиональных навыков человека;
- доступность метода обучения, так как не требуется длительная тренировка человека-оператора и углубленное (детальное) изучение каких-либо технических средств;
- наглядность хранения опыта движений, простота и надежность проверки результатов обучения.

Обучение робота показом (демонстрацией) рабочих операций включает следующие этапы:

- индивидуальное обучение рабочим движениям (навыкам, рабочим сценариям);
- отработка команд приема и передачи информации роботом;
- показ типового набора рабочих операций (сценариев), которые должен уметь выполнять данный робот в конкретных условиях и миссиях.

Рассмотрим простой и наглядный пример обучения робота движению обхода препятствия с использованием МФД.

Геометрические параметры топологии F_T формы движения обхода могут быть представлены, например, в следующем виде (рис. 3):

- X_B, Y_B, Z_B — координаты некоторой центральной точки траектории движения в заданной системе координат;
- DM_B — средний размер траектории движения, определяемый по некоторому базовому расстоянию: среднему, максимальному или заранее выбранному между определенными точками элементов траектории движения M_i и M_j ;
- αM_{ij} — угол между осями симметрии или базовыми (опорными) линиями отдельных фрагментов траектории (LM_i и LM_j);
- $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ — углы ориентации в пространстве центральной оси симметрии LM_{ij} конфигурации движения.

Для реализации обучения методом показа формы движения на основе МФД требуется в процессе

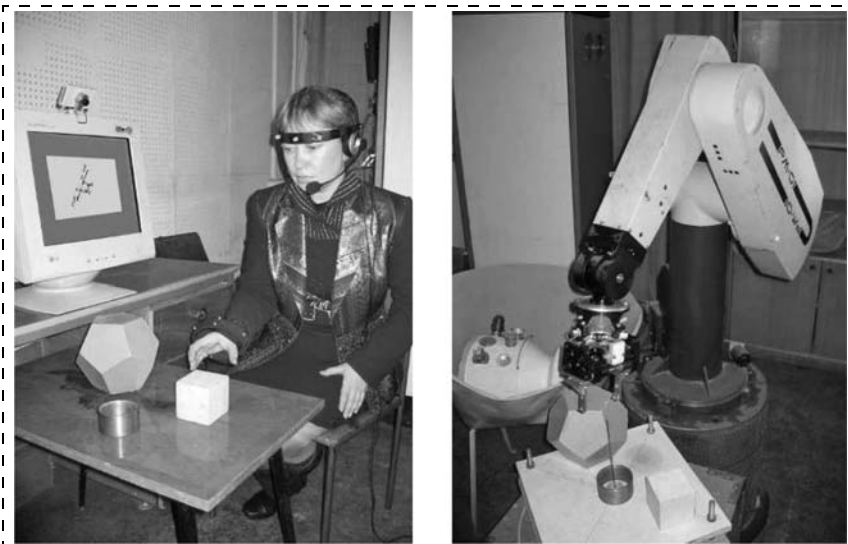


Рис. 2. Обучение взятию объектов показом движений руки и головы

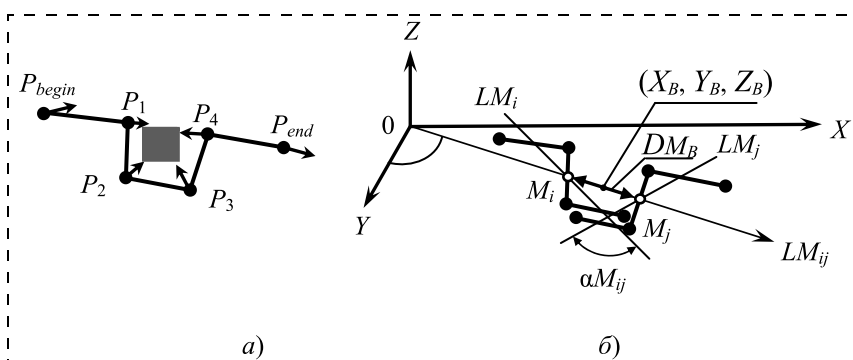


Рис. 3. Пример топологии движения обхода препятствия:

a — пример формы движения при обучении обходу препятствия; *б* — топология движения обхода в заданной системе координат

работы оператора с роботом формировать знания, необходимые для последующего выполнения движения (рабочей операции) роботом, которые автоматически записываются в формализованном виде в базу знаний (БЗ) системы управления робота. Авторами данной работы были реализованы несколько вариантов БЗ, в том числе с формированием знаний в нечетко-логическом базисе (рис. 4) [7].

В данном обобщенном методе формирования БЗ оператор ведет наблюдение за поведением робота с формированием вектора параметров обратных связей X и вектора управления U , которые преобразуются блоком ручного управления (РУ) в вектор сигналов управления Y .

Параллельно работает обучающий алгоритм, который обрабатывает векторы X и U и в случае подтверждения правильности управления от оператора формирует правило в виде отображений $X_p \rightarrow Y_p$.

Нечетко-логический вариант системы обучения БЗ робота основан на нечетком представлении входных и выходных переменных с использованием шкал, показывающих наборы термов (поименованных квантов переменных) и соответствующих им функций принадлежности. На рис. 5 показаны

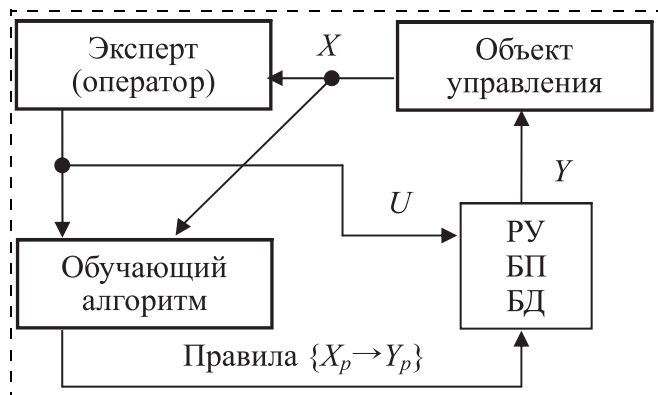


Рис. 4. Схема формирования БЗ в нечетко-логическом базисе

шкалы и функции принадлежности треугольной формы для термов входной X_p и выходной Y_p нечетких переменных на примере $X_p \rightarrow Y_p$:

- М — терм "малое";
- С — терм "среднее";
- Б — терм "большое".

Конкретные значения переменных проектируются на соответствующие оси двух функций принадлежности $\mu(X)$ и $\mu(Y)$, и в результате получают степени принадлежности конкретных значений входных и выходных переменных к соответствующим термам.

На их основе в БЗ системы управления робота формируются четыре лингвистических правила (БП) и соответствующие им отношения степеней принадлежности (БД), которые связаны с обрабатываемым примером:

$$\text{БП:} \begin{cases} x_M \rightarrow y_M; \\ x_M \rightarrow y_C; \\ x_C \rightarrow y_M; \\ x_C \rightarrow y_C; \end{cases} \quad \text{БД:} \begin{cases} \mu_{X_p}^M \rightarrow \mu_{Y_p}^M; \\ \mu_{X_p}^M \rightarrow \mu_{Y_p}^C; \\ \mu_{X_p}^C \rightarrow \mu_{Y_p}^M; \\ \mu_{X_p}^C \rightarrow \mu_{Y_p}^C. \end{cases}$$

Так могут быть обработаны все последовательно формируемые при обучении робота примеры движений, показанные, например, естественными движениями руки человека.

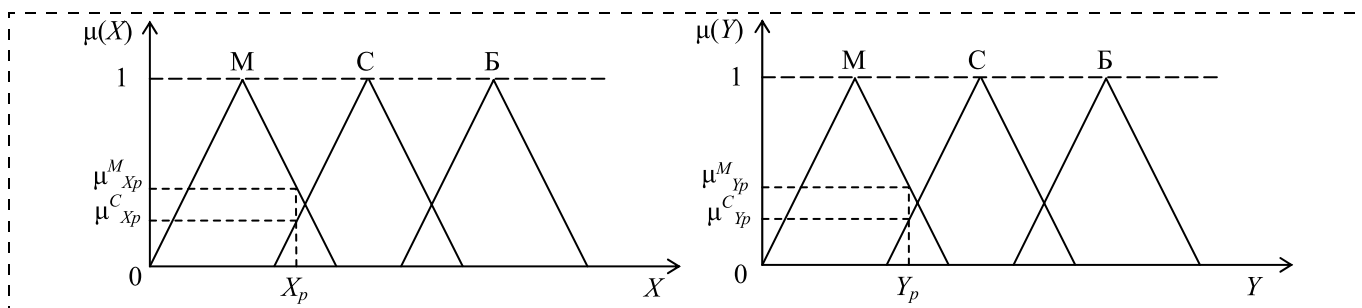


Рис. 5. Функции принадлежности входной и выходной переменных БЗ

Конечная цель работы обучающего алгоритма — обобщить все полученные БП и БД и убрать избыточность в общей БЗ системы управления робота после обучения.

Обучение роботов групповому поведению с реконfigurацией

Обучение группы гетерогенных (разнородных по функциональному назначению) роботов возможно по общему сценарию с коррекцией поведения в процессе телеуправления при передаче команд от робота к роботу.

Обучение группы роботов показом (демонстрацией) необходимых взаимодействий и сценариев коллективной работы включает следующие этапы:

- обучение группы роботов типовым взаимодействиям (операциям);
- совместная отработка команд передачи информации;
- показ примеров реконfigurации группы;
- показ типового набора сценариев работы группы.

На примере команды роботов-футболистов (3...5 роботов типа *NAO*) покажем варианты сигналов взаимодействия, передачи функций и реконfigurации группы.

В примерный перечень возможных вариантов коррекции поведения группы роботов на примере роботов-футболистов входят:

- сигналы роботов о повреждениях и необходимости замены;
- сигналы обнаружения непредвиденной ситуации и/или условий на поле;
- сигналы передачи функций в группе и передачи управления;
- сигналы смены сценариев поведения при возникновении новых ситуаций;
- сигналы капитана (робота) тренеру о новой ситуации и запроса помощи;
- сигналы коррекции миссии от тренера и сигналы подтверждения робота;
- сигналы информации о поведении команды противника и/или их намерениях;
- ложные, отвлекающие команду противника и их тренера сигналы и знаки.

Возможности передачи функций и реконfigurации группы роботов-футболистов для выполне-

ния миссии на основе заранее обученных вариантов сценариев и их комбинаций следующие:

- смена капитана при замене, удалении с поля и/или по команде тренера;
- передача функций вратаря, защитника, полузащитника и нападающего;
- увеличение числа защитников, нападающих, полузащитников;
- изменение схемы расстановки роботов на поле (позиционной схемы);
- коррекция динамической схемы атаки (защиты, отбора мяча, другой тактики);
- выполнение нескольких функций одними и теми же роботами;
- ложные, отвлекающие расстановки и схемы движения роботов на поле.

Для передачи управления, например функции капитана команды, в процессе выполнения миссии (игры на поле) необходимо передать команду всем роботам в команде непосредственно от человека (тренера) или последовательно от одного робота на поле к другому роботу.

В качестве такой команды, воспроизводимой (транслируемой) человеком и роботами, может быть жест, звуковой сигнал или "сигнальная поза" (рис. 6, см. третью сторону обложки).

Необходимость оперативной коррекции сценария (миссии) команды роботов-футболистов может быть обусловлена целым рядом заранее предполагаемых, а также непредвиденных ситуаций, в том числе:

- повреждение (невозможность движения) одного из роботов;
- потеря управления и/или связи с тренером одного (нескольких) роботов;
- замена робота на запасного согласно правилам игры;
- удаление с поля одного из роботов;
- наличие нескольких мячей и/или посторонних предметов на поле;
- силовое воздействие (нападение) одного (нескольких) роботов противника;
- выключение света, появление солнечных и других световых помех;
- появление неожиданных объектов и препятствий на поле.

При возникновении новых ситуаций реконфигурация и передача управления в группе роботов выполняется роботом-капитаном в автономном режиме с передачей сообщений тренеру и получением от него, в случае наличия связи, дополнительных инструкций (коррекции).

Для реализации возможностей передачи команд коррекции сценариев необходимо предварительное обучение роботов распознаванию жестов и "сигнальных поз" тренера и движений других роботов, например методом показа движений.

Рассмотрим пример применения МФД для описания сценария атаки группой роботов-футболистов с целью забить гол в ворота противника.

Объекты МФД — координированные действия игроков нападающей группы (формации) $\{B\}$, включающие: (1) ведение мяча, (2) удар по воротам, (3) пас партнеру, (4) занятие позиции для принятия паса, (5) захват мяча при пасае.

Выделим два класса объектов $\{K_B\}$: траекторные движения и действия.

Семантика объекта $\{B_S\}$: имя игрока (нападающий, полузащитник, защитник, вратарь), маркеры поля (разметка, ворота, игроки партнеры и противники), атрибуты связей (видение мяча, партнер и противника, передача сообщений).

Топология объекта $\{B_T\}$: номер игрока, геометрия поля и позиция игрока, атрибуты действий (наличие мяча, позиция партнера, позиция противника, содержание сообщения).

Отношения между объектами $\{R\}$: (1) дать пас партнеру, (2) получить пас от партнера и другие.

Такое описание МФД является своеобразной спецификацией, позволяющей четко реализовать сценарий атаки. При этом должны быть программно определены процедуры выполнения соответствующих действий и взаимосвязей игроков (рабочие сценарии).

Телеуправление поведением группы роботов

Результаты экспериментальных исследований, проведенных с использованием группы реальных роботов *NAO* и виртуальной игровой среды, подтвердили возможность телеуправления роботами различного функционального назначения на основе типового набора заранее обученных рабочих движений.

Телеуправление группой, например роботов-футболистов, выполняется в зависимости от ограничений (правил игры) миссии следующим образом:

- ведется оперативное наблюдение и анализ ситуации и состояния команды;
- непрерывно уточняется прогноз развития ситуации, состояния команды и хода выполнения миссии;
- всеми возможными способами (жестами, знаками, звуками) тренер корректирует действия отдельных роботов и подсказывает им варианты индивидуального поведения;
- отдельно капитану команды тренер заранее предусмотренными или любыми другими способами передает сигналы смены сценариев и коррекции хода миссии;
- капитан команды (или любой другой робот) передает тренеру сообщения о состоянии группы роботов, принятые решения о реконфигурации группы и другую информацию.

Телеуправление может выполняться при наличии моделирующих средств (карты прогноза миссии) с учетом заранее обученных наборов сценариев (рабочих операций).

На основе заранее обученных рабочих операций, типовых методов и вариантов сценариев возможна коррекция хода выполнения миссии авто-

номно капитаном команды при взаимодействии (телеуправлении) с человеком-оператором (тренером) (рис. 7, см. третью сторону обложки).

Коррекция рабочих операций, выбора и комбинации фрагментов из набора сценариев группы роботов осуществляется по специальному "Протоколу коррекции миссии" по различным каналам связи, в том числе посредством сети Интернет.

Протокол коррекции миссии может быть представлен на стандартном языке типа *XML* в семантическом и графическом виде и включает в себя следующие объекты:

- "Схема" = коррекция позиционной и динамической схем группы;
- "Работа" = перераспределение и объединение функций роботов в группе;
- "Резерв" = введение резервов функций и "домашних заготовок" в действия группы;
- "Смена" = смена тактики, темпа и техники выполнения функций группы и отдельных роботов;
- "Переход" = переход от одного сценария к другому, выбор вариантов достижения цели миссии;
- "Передача" = передача от капитана новой информации о ситуации на основе известных сценариев;
- "Прием" = прием капитаном новых (составной схемы, комбинации) схем и сценариев.

Для обеспечения телеуправления предлагается на каждом роботе реализовать алгоритмы передачи визуальной и аудиоинформации с автоматическим управлением качеством изображения в зависимости от фактической полосы пропускания каналов связи.

Основные отличия предлагаемых методов телеуправления группами роботов:

- 1) адресный доступ к узлам системы телеуправления;
- 2) работа системы с использованием различных физических методов передачи в каналах связи (акустический, визуальный, оптический, радиотехнический);
- 3) работа системы с различными скоростями передачи данных в широком динамическом диапазоне;
- 4) автоматическая реконфигурация системы телеуправления при изменении статуса доступности связи между узлами сети;
- 5) защищенный шифрованный канал передачи данных между узлами сети.

Этот же стандарт может быть эффективно использован для обмена видео и акустической информацией человека-оператора (тренера) с командой роботов-футболистов.

В качестве основы для создания информационной системы предлагается принять семейство Интернет-протоколов *IPv4* [31], которое отвечает всем поставленным задачам. Кроме того, протокол *IPv4* имеет хорошую документацию.

Использование семейства протоколов *IPv4* позволяет программным образом получать отладочную информацию о текущем состоянии информационной сети.

Это дает возможность осуществлять "обратную связь" в информационной сети телеуправления роботами для адаптивного управления типом и размером корректирующего сигнала, выбором маршрута и способа доведения коррекции до каждого робота в команде.

Кроме того, текущее состояние информационной сети телеуправления необходимо знать для реконфигурации ресурсов сети, ее отладки и управления.

Для обеспечения безопасных каналов передачи данных предлагается осуществлять объединение узлов в виртуальную частную сеть.

На узлах сети должно быть размещено программное обеспечение, способное отслеживать работоспособность различных каналов связи и реконфигурировать текущее состояние использования каналов связи с прогнозом по заранее заданным сценариям (миссиям) группы роботов.

Заключение

Эффективность предложенных подходов к обучению и телеуправлению для группы роботов подтверждена результатами компьютерного моделирования и экспериментов с андроидными роботами-футболистами.

Телеуправление поведением группы андроидных роботов возможно как по общему сценарию для группы, так и по индивидуальному сценарию для коррекции (дообучения) поведения с возможностью передачи (трансляции) знаний от робота к роботу.

Результаты проводимых исследований могут найти применение при создании перспективных технологий обучения и систем телеуправления промышленными, космическими и сервисными роботами.

В настоящее время авторами выполняются проекты по созданию интеллектуальных роботов-ассистентов для медицины и телемедицины в помощь врачу и пациенту, а также для домашнего и офисного применения.

Список литературы

1. **Hirzinger G.** Sensor-based space robotics — ROTEX and its telerobotic features // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1993. Vol. 9, N. 5.
2. **Kim W. S., Schenker P. S., Bejczy A. K., Leake S., Ollendorf S.** An Advanced Operator Interface Design with Preview/Predictive Displays for Ground Controlled — Space Telerobotic Servicing // SPIE Conference 2057, Telemanipulator Technology and Space Telerobotics. Boston, MA, Sept. 1993. P. 96—107.
3. **Hirzinger G., Brunner B., Knoch S., Koeppel R., Schedl M.** Towards a new Robot Generation. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e. V. (DLR) Oberpfaffenhofen, Wessling // The 8th International Symposium, Schohan, Japan, 4—7 Oct. 1997.
4. **Kulakov F.** Methodology of Virtual Body Immersion into Real Environment // Proc. 4th International Workshop CSIT'2002, Patras, Greece, 2002.
5. **Kulakov F. M., Nechaev A. I.** Advanced man-machine interface for telerobotic based on man-operator's motions and gaze

direction tracking // 6th International seminar "Science and computing", Moscow, 15—17 September, 2003.

6. **Силиненко А. В.** Российско-германский космический эксперимент "Контур-2". URL: http://knts.tsniimash.ru/ru/src/Conf_InfRes/Силиненко%20А.В.

7. **METERON**. URL: robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2011/.../03_schiele.pdf.

8. **Заборовский В. С., Кондратьев А. С., Мулюха В. А., Силиненко А. В., Ильяшенко А. С.** Управление группировками напланетных роботов с борта пилотируемой орбитальной станции в рамках проекта "METERON" // Труды СПбПУ, 2012. 6 (162).

9. **С МКС** управляют наземным роботом. URL: www.Vesti.ru (дата обращения 05.07. 2013).

10. **Remote telepresence** A new tool for space exploration. American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace America, February 2013. P. 38—44.

11. URL: <http://knts.tsniimash.ru/ru/src/bulletin/ВЫПУСК%20%2016.pdf/> Проект "Робонавт"

12. URL: www.kyb.tue.mpg.de/.../ICRA09_1027_FI_%5B0%5D.pdf. Проект "Justin" DLR.

13. **Андроидный** робот SAR-400, Новости ВПК, Внекорабельную деятельность скоро будут осуществлять роботы, 02.07.2014, URL: vpk.name.

14. "Создание роботов космического назначения для поддержки внекорабельной деятельности космонавтов", ТЗ на ОКР № 56/9/16 "ПЛОИ (Косморобот)" Федеральная космическая программа России на 2016—2025 годы, Приложение 4, раздел 1, подраздел 4.

15. URL: <http://www.fiba.com.> (*Official rule of basketball in FIBA*).

16. **Станкевич Л. А.** Многоагентная программная среда футбола роботов и разработка программных агентов для RoboCup // Труды международной конференции "Искусственный интеллект в 21-м веке" (ICAI 2001). Т. 3. М.: Физматгиз, 2001.

17. **Gorodetski V. I. and Lebedev A. N.** Multi-agent Technology for Planning, Scheduling, and Resource Allocation // In Third Int. Conf. on Multi-Agent Systems, Paris, France, 1998.

18. **Stankevich L. A.** A cognitive agent for soccer game // Proc. of First Workshop of Central and Eastern Europe on Multi-agent Systems (СЕЕМАС'99), Printed by "Anatoliy", S-Petersburg, 1999.

19. **Станкевич Л. А.** Многоагентная технология для когнитивных систем управления автономными роботами. "Экстремальная робототехника // Труды X конференции, Санкт-Петербург". СПб.: Изд-во СПб ГПУ, 1999.

20. **Станкевич Л. А.** Когнитивная робототехника // Экстремальная робототехника. Тр. X конф., Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПб ГПУ, 2002.

21. **Станкевич Л. А.** Когнитивные структуры и агенты в интеллектуальных системах управления роботов // Новости искусственного интеллекта. 2004. № 1. С. 41—55.

22. **Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М., Нечаев А. И.** Обучение робота методом показа с использованием "осязательной перчатки" // Тр. Первой Международной конференции по мехатронике и робототехнике "МиР-2000". Т. 2. 2000. С. 155—164.

23. **Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М.** Информационная технология обучения роботов показом движений. Часть I. Концепция и принципы моделирования движений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 7. С. 23—28.

24. **Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М.** Информационная технология обучения роботов показом движений. Часть II. Алгоритмы и реализация модели формы движения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 8. С. 24—29.

25. **Минский М.** Фреймы для представления знаний: Пер. под ред. Ф. М. Кулакова. М.: Энергия, 1979, 152 с.

26. **Алферов Г. В., Кулаков Ф. М., Нечаев А. И., Чернакова С. Э.** Информационные системы виртуальной реальности в мехатронике и робототехнике: учеб. пособ. СПб.: Изд-во С.-Пб. ун-та, 2009. 168 с.

27. **Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М., Крючков Б. И., Усов В. М.** Применение технологий виртуальной и дополненной реальности в инженерно-психологическом проектировании (на примере дистанционного управления манипуляционным роботом методом показа движений) // Труды Института психологии РАН. 2014. Вып. 6. С. 54—73.

28. **Чернакова С. Э., Кулаков Ф. М., Крючков Б. И., Карпов А. А., Нечаев А. И., Усов В. М.** Включение робота-ассистента в совместную с космонавтами деятельность методом "обучения показом движений" // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 2 (3). С. 29—32.

29. **Чернакова С. Э., Крючков Б. И., Усов В. М., Кулаков Ф. М.** Построение "тренажера-интерфейса" как способ планирования телеуправления манипуляционным роботом // Сб. тр. XII Всероссий. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014). Москва, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 16—19 июля 2014 года. С. 3991—3997.

30. **Chernakova S. E., Kulakov F. M.** Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation // River Publishers Series in Automation, Control and Robotics. Chapter 5. "Information Technology for Interactive Robot Task Training Through Demonstration of Movement". P. 95—123.

31. **Протокол IPv4** — Вычислительные сети. URL: just-networks.ru/seti-tcp-ip/protokol-ipv4

Human — Robot Interaction During Learning and Telecontrol of the Heterogenic Robotic Systems Based on a Movement Shape Model

S. E. Chernakova, s_chernakova@rambler.ru✉,

St-Petersburg ITMO University, St-Petersburg, 199034, Russian Federation,

L. A. Stankevich, stankevich_lev@inbox.ru, **S. V. Hlopın**, hlserg@mail.ru,

St-Petersburg State Polytechnic University, St-Petersburg, 195251, Russian Federation,

A. I. Nechaev, a_nechaev@rambler.ru, Scientific-Testing Institute of Ergatic Systems Co., Moscow region, Zhukovsky, 140180, Russian Federation

Corresponding author: **Chernakova Svetlana E.**, Researcher, St-Petersburg ITMO University, St-Petersburg, 199034, Russian Federation, e-mail: s_chernakova@rambler.ru

Received on July 30, 2016

Accepted on December 31, 2016

The authors consider the problems of interaction of operators and robots, learning and telecontrol of the groups of different-function (heterogenic) robots. The learning-by-showing method is used ensuring recognition of the natural movement's shape of a human operator. The preliminary learning of the gesture and "signal" pose recognition of both human and android robot is based on (teaching) learning-by-showing method. The Model of Movements Shape (MMS) is based on M. Minsky theory of the frame knowledge representation proposed for memorizing of the semantic-topology frames system of the typical shapes of the working movements such as the typical scenario of a robot's behavior. Some typical objects {B} of MMS are: simple robot movements, fragments of a complex shape of the robot movement trajectories or sequences (cyclogrammes) of the working robot operations (fragments of scenarios of a robot behavior). Semantic features of {B} are determined as frame with name, pa-

М. В. Бобырь, д-р техн. наук, проф., fregat_mn@rambler.ru,
С. А. Кулабухов, аспирант, kulabuhov.sergei@yandex.ru,
А. С. Якушев, магистрант, alekseyakushev@yandex.ru,
Юго-Западный государственный университет, Курск

Автономная система охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ. Часть I*

Представлена аппаратно-программная реализация трехосевого фрезерного станка с ЧПУ с автономной системой охлаждения режущего инструмента. Описаны электронные и механические компоненты данной системы. Также представлены электрические схемы соединения компонентов станка и автономной системы охлаждения. Для увеличения производительности станка предложен метод охлаждения режущего инструмента с помощью элемента Пельтье.

Ключевые слова: станок с ЧПУ, автономная охлаждающая система, элемент Пельтье, датчики температуры

Введение

Быстрый рост технического прогресса формирует новые требования к обрабатывающим центрам и станкам с ЧПУ. Потребность в увеличении точности возникает из-за усложнения задач, решаемых с помощью станков с ЧПУ. Кроме повышения точности возникает необходимость снижения затрат на режущий инструмент, что увеличивает экономический эффект, получаемый от станка.

Для продления срока службы обрабатывающего инструмента и увеличения производительности станка используются различные системы охлаждения. В настоящее время применяются несколько типов охлаждения: воздушное охлаждение и сма-

зочно-охлаждающие жидкости (СОЖ). При обработке заготовок из металла возможно использовать любой из способов охлаждения. В случае деревообработки применение СОЖ невозможно из-за физических свойств древесины.

Авторами для охлаждения режущего инструмента, используемого в трехосевых станках с ЧПУ, разработана автономная система с термоэлементом, основанная на физическом эффекте Пельтье.

Структура трехосевого фрезерного станка с ЧПУ

Автономная система охлаждения режущего инструмента для трехосевого фрезерного станка с ЧПУ состоит из микроконтроллера Arduino Mega 2560,

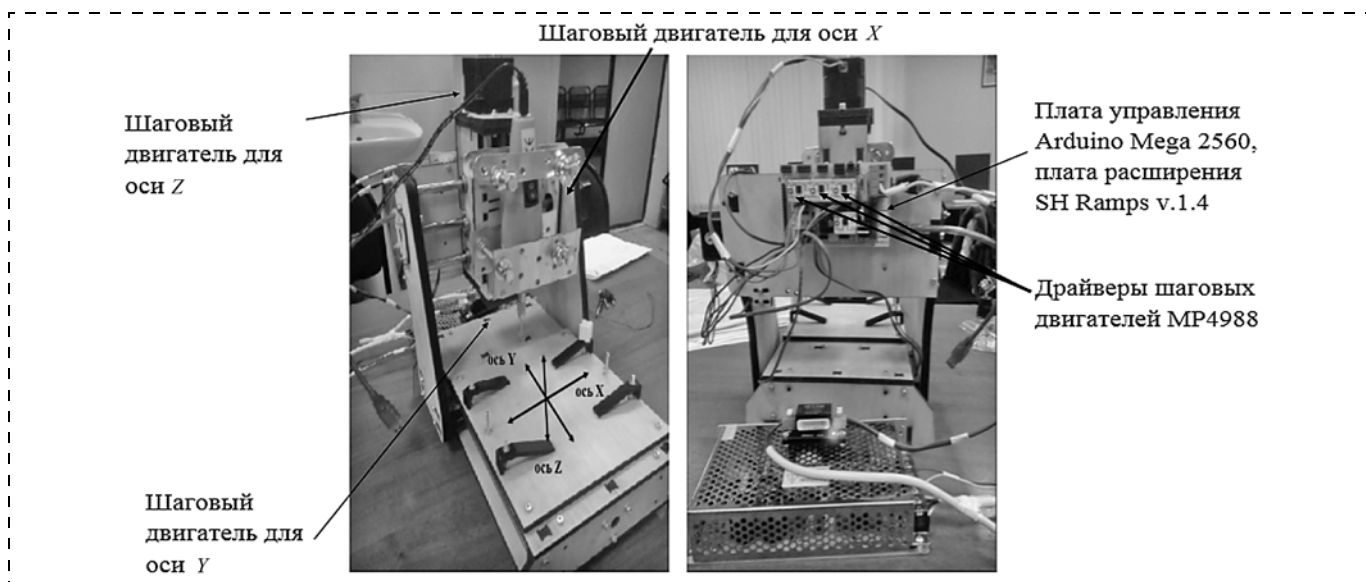


Рис. 1. Трехосевой фрезерный станок с ЧПУ

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-707.2017.8 и Госзадания: Соглашение № 2.3440.2017/ПЧ.

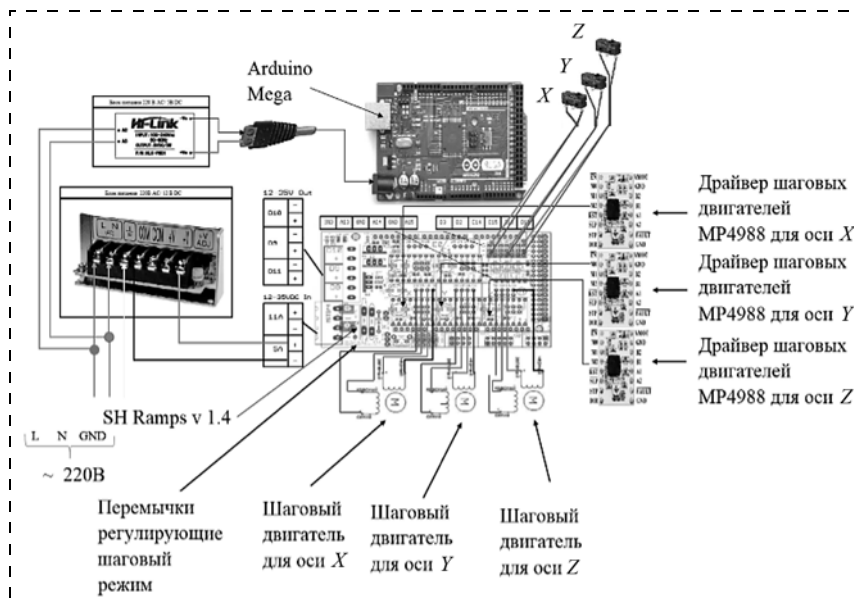


Рис. 2. Электрическая схема трехосевого фрезерного станка с ЧПУ

платы управления шаговыми двигателями Arduino Mega SH Ramps v.1.4, блока питания 12 В постоянного напряжения, трех плат для управления шаговыми двигателями MP4988, трех шаговых двигателей с шагом $1,8^\circ$, трех трап-валов, микропереключателей для ограничения движений суппортов станка по каждой из осей, мини-дрели с фрезерными, гравировальными и шлифующими насадками, линейных направляющих, радиальных и линейных подшипников, держателей заготовки и рабочего стола [1–3].

На рис. 1 представлена экспериментальная модель трехосевого фрезерного станка с ЧПУ. Электрическая схема подключения и соединения компонентов трехосевого фрезерного станка с ЧПУ представлена на рис. 2. Плата управления шаговыми двигателями SH Ramps устанавливается сверху на микроконтроллер Arduino Mega 2560. Драйверы двигателей закрепляются на плате SH Ramps в специально отведенные места для данных драйверов [4].

Точность трехосевого фрезерного станка с ЧПУ

Данный станок имеет три шаговых двигателя, по одному двигателю на каждую из осей. Для управления скоростью шаговых двигателей используется плата SH Ramps v.1.4 с устанавливаемыми на ней драйверами двигателей MP4988 [5–7].

На рис. 3 представлена экспериментальная схема подключения шагового биполярного двигателя постоянного тока к драйверу двигателей. В качестве платы управления для тестирования шаговых двигателей использовался микроконтроллер Arduino Uno.

Расчет шага двигателя необходим для выбора точности и скорости обработки детали, а также для реализации программного кода управления станком с ЧПУ. Для расчета числа импульсов n , необходи-

мых для поворота шпинделя биполярного двигателя на один полный оборот, необходимо 360° разделить на угловой шаг, равный $1,8^\circ$:

$$n = 360^\circ / 1,8^\circ = 200.$$

Таким образом, для вращения на один полный оборот шпинделя шагового двигателя необходимо с помощью программного кода подать 200 импульсов.

При изменении шага двигателя меняется и число шагов за один полный оборот. В случае работы в режиме полушага для вращения на 360° необходимо подать 400 импульсов [10, 11].

Рассчитав число импульсов, необходимых для полного оборота шпинделя биполярного двигателя, необходимо определить перемещение по винтовому трап-валу за один оборот. Шаг резьбы у трап-вала состав-

ляет 2 мм, т.е. суппорт станка за полный оборот переместится на 2 мм (рис. 4).

В программном коде для прямолинейного перемещения суппорта по трап-валу в цикле for переменная i , задающая число переданных на биполярный двигатель импульсов, меняется от 0 до 1000. Таким образом, при $i = 1000$ суппорт станка переместится на 5 мм при переключении переключателя на размер полного шага. Скорость перемещения каретки станка за-

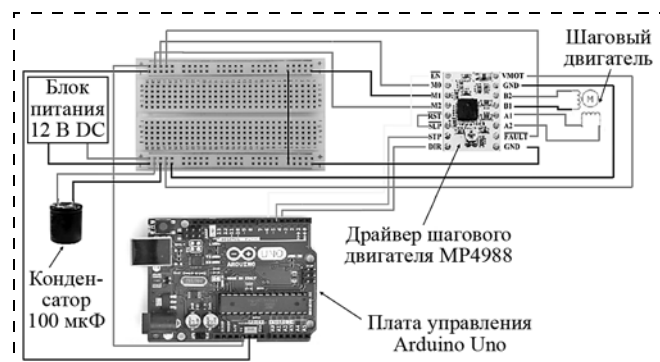


Рис. 3. Электрическая схема подключения биполярного двигателя к драйверу шагового двигателя MP4988 и к плате Arduino Uno



Рис. 4. Перемещение гайки суппорта станка по трап-валу

висит от функции `delayMicroseconds(500)`. При увеличении числового значения в этой функции скорость перемещения каретки увеличивается, и наоборот.

Автономная система охлаждения режущего инструмента станка с ЧПУ

Для расширения функциональных возможностей фрезерного станка с ЧПУ и продления срока службы режущего инструмента авторами предложено применять термоэлементы, использующие эффект Пельтье. В элементах Пельтье при прохождении прямого тока с одной стороны выделяется тепло, с другой стороны — холод. Холодная сторона используется для охлаждения режущего инструмента в зоне резания [12, 13].

В дополнение к вентилятору, охлаждающему сторону, выделяющую тепло, на элементе Пельтье в схему автономной системы охлаждения монтируются два датчика температуры, отслеживающие температуру возле режущего инструмента и температуру на теплой стороне элемента Пельтье. Наличие двух термодатчиков позволяет использовать автономную систему охлаждения режущего инструмента как в постоянном режиме, так и в режиме включения при необходимости охлаждения. При использовании второго режима (периодического режима) рациональнее расходуется электроэнергия. По снимаемым показаниям с датчиков температуры программно регулируется скорость вращения вентилятора. В случае увеличения температуры на теплой стороне элемента Пельтье или возле режущего инструмента необходимо увеличить скорость вращения вентилятора с целью предотвратить перегрев элемента Пельтье или режущего инструмента. Помимо увеличения скорости вращения вентилятора необходимо повысить ток, передаваемый на элемент Пельтье, который увеличивает интенсивность поступления холода от термоэлемента. На рис. 5 изображена схема подключения элементов автономной системы охлаждения режущего инструмента станка с ЧПУ [14–16].

Для определения температур используются два датчика температуры LM335 и TMP36GZ [17, 18].

Для расчета температуры в градусах датчиком LM335 необходимо снять напряжение на аналоговом входе с помощью функции `analogRead`. Данная функция возвращает значения от 0 до 1023, и их необходимо преобразовать в напряжение по формуле

$$val = \text{analogRead}(A0);$$

$$U = val \cdot 5 / 1024,$$

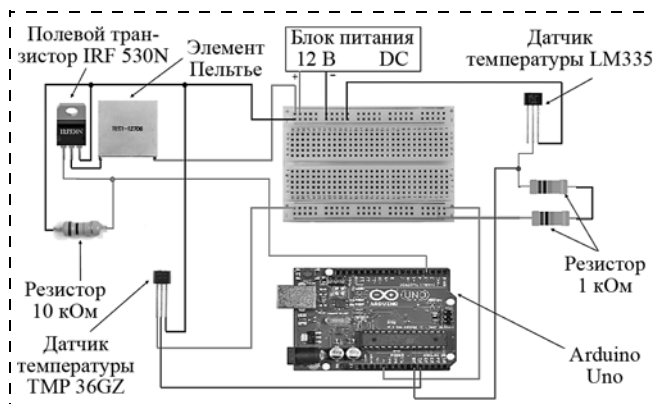


Рис. 5. Электрическая схема автономной системы охлаждения режущего инструмента

где U — преобразованное напряжение; val — величина, получаемая от информационного аналогового входа $A0$ с помощью функции `analogRead(A0)`.

Для перевода полученного напряжения в градусы Цельсия используется формула

$$t^{\circ} = U \cdot 100 - 273,15.$$

Для расчета температуры в градусах датчиком TMP36GZ необходимо так же, как и в случае с датчиком LM335, снять напряжение на аналоговом входе $A1$ с помощью функции `analogRead(A1)`:

$$val_1 = \text{analogRead}(A1);$$

$$U_1 = (val_1 / 1024,0) \cdot 5,0,$$

где U_1 — преобразованное напряжение; val_1 — величина, получаемая от функции `analogRead(A1)`.

Далее полученное значение необходимо перевести в градусы Цельсия по формуле

$$t^{\circ} = (U_1 - 0,5) / 100.$$

Экспериментальное исследование

Экспериментальная модель автономной системы охлаждения режущего инструмента на трехосевом фрезерном станке с ЧПУ на базе микроконтроллера Arduino Uno показана на рис. 6.

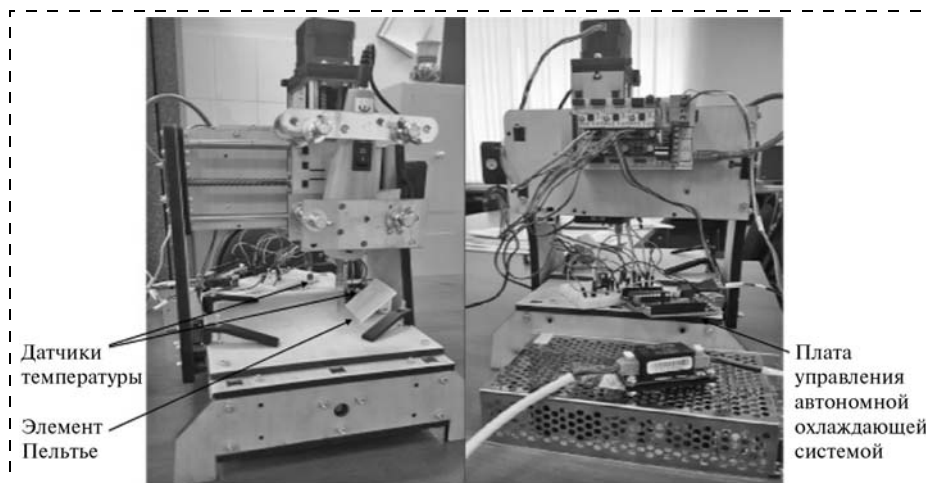


Рис. 6. Автономная система охлаждения режущего инструмента на станке с ЧПУ



Рис. 7. Изменение силы тока при работе шагового двигателя

Во время экспериментальных пусков двигателей при постоянном напряжении 12 В были изменены значения силы тока при старте, движении вперед/назад и реверсе. Были получены следующие значения токов:

$$I_{\text{старт}} = 260...280 \text{ (мА);}$$

$$I_{\text{вперед/назад}} = 130...160 \text{ (мА);}$$

$$I_{\text{реверс}} = 410...430 \text{ (мА).}$$

На рис. 7 показан график изменения силы тока при старте, движении вперед или назад, реверсе шагового двигателя.

График, представленный на рис. 7, в дальнейшем позволит программно учитывать особенности работы биполярного двигателя за счет регулировки задержки времени. Во второй части статьи будут рассмотрены вопросы, связанные с разработкой нечеткой системы, используемой для регулирования скорости охлаждения режущего инструмента.

Заключение

Основная проблема при работе станков с режущим инструментом — это достижение точности и качества обработки деталей. Решение данной проблемы при обработке древесины на станках с ЧПУ возможно за счет установки автономной системы охлаждения режущего инструмента. Практические опыты показали, что установка на станок данной системы увеличивает производительность станка с ЧПУ, а также продлевает срок службы режущего инструмента, снижая финансовые и временные затраты на контроль и заточку режущей кромки обрабатываемого инструмента.

Снятие показаний силы тока при различных режимах работы шагового двигателя позволяет программно учитывать особенности работы биполярного двигателя за счет регулировки задержки времени.

1. Бобырь М. В., Емельянов С. Г., Милостная Н. А. О некоторых свойствах моделирования адаптивных нейро-нечетких систем на основе упрощенного нечетко-логического вывода // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12, № 5. С. 4—12.
2. Бобырь М. В. Влияние числа правил на обучение нечетко-логической системы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 11 (125). С. 28—35.
3. Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Титов Д. В. Оценка влияния числа обучаемых точек на аддитивность нечетких систем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 10. С. 30—35.
4. Бобырь М. В. Адаптация системы управления мобильным роботом на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 7. С. 449—455.
5. Бобырь М. В., Милостная Н. А. Нечеткая модель интеллектуальной системы управления мобильным роботом // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 57—67.
6. Бобырь М. В., Кулабухов С. А. Дефазификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 9 (135). С. 32—41.
7. Бобырь М. В., Милостная Н. А. Анализ использования мягких арифметических операций в структуре нечетко-логического вывода // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 7. С. 7—15.
8. Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Милостная Н. А. Обучение нейро-нечеткой системы на основе метода разности площадей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 4. С. 15—26.
9. Бобырь М. В., Титов В. С., Милостная Н. А. Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний. Часть 1. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 10. С. 8—14.
10. Седова Н. А., Седов В. А. Методы оценки качества полученных решений // Южно-Сибирский научный вестник. 2012. № 1. С. 88—91.
11. Голубкин И. А., Щербатов И. А. Универсальная сенсорная подсистема мобильного колесного робота // Датчики и системы. 2010. № 8. С. 32—35.
12. Круглова Т. Н. Интеллектуальный метод диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов, эксплуатируемых в экстремальных условиях // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 3. С. 47—51.
13. Круглова Т. Н. Применение аппарата нечеткой логики и нейронных сетей для управления техническим состоянием модулей движения технологического оборудования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2010. № 8. С. 28—35.
14. Чикуров Н. Г. Управление движением инструмента на пятикоординатных станках с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 37—43.
15. Евстафьева С. В., Молодцов В. В. Моделирование следающего привода подачи современных станков с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 9. С. 37—44.
16. Кузовкин В. А., Филатов В. В., Чумаева М. В. Моделирование процессов управления бесконтактным двигателем постоянного тока // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 11. С. 49—55.
17. Hui Liu, En Ming Miao, Xin Yuan Wci, Xin Dong Zhuang. Robustness modeling method for thermal error of CNC machine tools based on ridge regression algorithm // International journal of machine tools and manufacture. 2016. Vol. 113. P. 35—48.
18. Емельянов С. Г., Титов В. С., Бобырь М. В. Интеллектуальные системы на основе нечеткой логики и мягких арифметических операций: учеб. пособ. М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2014. 341 с.

Autonomous Cooling System for a Cutting Tool in the Task of Operation of CNC Equipment. Part I

M. V. Bobyr, fregat_mn@rambler.ru✉, **S. A. Kulabuhov**, kulabuhov.sergei@yandex.ru,
A. S. Yakushev, alekseiyakushev@yandex.ru,
South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation

Corresponding author: **Bobyr Maksim V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation,
e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Received on January 30, 2017

Accepted on April 07, 2017

This article presents a hardware-software implementation of a 3-axial milling machine with CNC and autonomous system of cooling of the cutting tool, and describes the electronic and mechanical components of this system. They include control boards of Arduino Mega and Arduino Uno, a control board for SH Ramps stepping motors, control boards for MP4988 stepping motors, stepping bipolar motors, fixture, conical and radial bearings, bonding wires and power supply units, and also the milling head (the engraver or a mini-drill) with a set of mills. Calculation of the number of pulses, necessary for rotation of the bipolar engine to the necessary degree, and also calculation of the relocation of a nut of support on a ladder are shown for one whole revolution. Electric circuits for connection of the components of the machine and the autonomous cooling system are also provided, as well as a program code for control of the relocation of the bipolar stepping motor and a formula of the tension transfer from the temperature sensors in Celsius degrees. For increasing the productivity of the machine the method of cooling of a cutting tool by means of Peltier element is offered. Cooling is carried out due to the temperature control in the cutting zone by a thermal sensor. Currents of the bipolar stepping motor are measured in operation during the starts, reverse action, constant turns and stops.

Keywords: machine with CNC, autonomous cooling system, Peltier element, temperature sensors

Acknowledgements: The work was done with support of MD-707.2017.8 Grant of the RF President and state assignment: Agreement No. 2.3440.2017/PCH.

For citation:

Bobyr M. V., Kulabuhov S. A., Yakushev A. S. Autonomous Cooling System for a Cutting Tool in the Task of Operation of CNC Equipment. Part I, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 469–473.

DOI: 10.17587/mau.18.469-473

References

1. **Bobyr M. V., Emel'janov S. G., Milostnaja N. A.** *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy*, 2014, vol. 12, no. 5, pp. 4–12 (in Russian).
2. **Bobyr M. V.** *Vestnik Komp'yuternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2014, no. 11 (125), pp. 28–35 (in Russian).
3. **Bobyr M. V., Kulabuhov S. A., Titov D. V.** *Promyshlennyye ASU i Kontrollery*, 2014, no. 10, pp. 30–35 (in Russian).
4. **Bobyr M. V.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 449–455 (in Russian).
5. **Bobyr M. V., Milostnaja N. A.** *Problemy Mashinostroenija i Avtomatizacii*, 2015, no. 3, pp. 57–67 (in Russian).
6. **Bobyr M. V., Kulabuhov S. A.** *Vestnik Komp'yuternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2015, no. 9 (135), pp. 32–41 (in Russian).
7. **Bobyr M. V., Milostnaja N. A.** *Vestnik Komp'yuternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2015, no. 7, pp. 7–15 (in Russian).
8. **Bobyr M. V., Kulabuhov S. A., Milostnaja N. A.** *Iskusstvennyj Intellekt i Prinjatje Reshenij*, 2016, no. 4, pp. 15–26 (in Russian).
9. **Bobyr M. V., Titov V. S., Milostnaja N. A.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 10, pp. 8–14 (in Russian).
10. **Sedova N. A., Sedov V. A.** *Juzhno-Sibirskij Nauchnyj Vestnik*, 2012, no. 1, pp. 88–91 (in Russian).
11. **Golubkin I. A., Shherbatov I. A.** *Datchiki i Sistemy*, 2010, no. 8, pp. 32–35 (in Russian).
12. **Kruglova T. N.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 3, pp. 47–51 (in Russian).
13. **Kruglova T. N.** *Vestnik Komp'yuternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2010, no. 8, pp. 28–35 (in Russian).
14. **Chikurov N. G.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 6, pp. 37–43 (in Russian).
15. **Evstafieva S. V., Molodcov V. V.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 9, pp. 37–44 (in Russian).
16. **Kuzovkin V. A., Filatov V. V., Chumaeva M. V.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 11, pp. 49–55 (in Russian).
17. **Hui Liu, En Ming Miao, Xin Yuan Wci, Xin Dong Zhuang.** *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 113, pp. 35–48 (in Russian).
18. **Emelyanov S. G., Titov V. S., Bobyr M. V.** *Intellektual'nye sistemy na osnove nechetkoi logiki i myagkikh arifmeticheskikh operatsii* (Intelligent systems based on fuzzy logic and soft arithmetic), Moscow, ARGAMAK MEDIA, 2014, 341 p. (in Russian).

В. Ф. Петрищев, д-р техн. наук, вед. научн. сотр., mail@samspace.ru,
АО "Ракетно-космический центр "Прогресс", г. Самара

Энергосберегающий алгоритм управления переориентацией космического аппарата по зашумленным измерениям

Разработан оптимальный по энергозатратам алгоритм дискретного управления переориентацией космического аппарата из произвольного начального в заданное конечное положение по зашумленным измерениям. Приведены результаты математического моделирования разработанного алгоритма на примере космического аппарата "Ресурс-П", управляемого с использованием инерциальных исполнительных органов (гиродин). Результаты моделирования подтвердили эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: алгоритм, гироскоп, динамика, качество, ковариация, момент, прецессия, система, состояние, управление

Введение

Задача периодической смены ориентации (переориентации) космического аппарата (КА) ставится практически перед каждым КА. Но наиболее динамичным является КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Он реализует большую номенклатуру поворотов, в том числе: из произвольного положения при наблюдении поверхности Земли в положение, при котором нормаль к плоскости фоточувствительных элементов солнечных батарей направлена на Солнце для обеспечения подзаряда буферных батарей бортовой системы электропитания, и обратно; повороты оси маршевого двигателя в целях выдачи импульса поддержания заданных параметров рабочей орбиты, и обратно. Но наибольшее число поворотов КА ДЗЗ связано с необходимостью динамичного перенацеливания оптической оси бортового оптико-электронного комплекса для проведения съемки заданных участков поверхности Земли.

Традиционно задача переориентации КА связывается с задачей построения оптимальной программы управления, обеспечивающей перевод КА из одного заданного углового положения в другое заданное положение за заданное время и при заданном показателе качества. Решению этой задачи посвящено большое число работ. Одной из первых является работа [1]. В ней и в последующих работах задача решалась преимущественно с использованием принципа максимума Л. С. Понтрягина. Большинство решений соответствует вращению КА относительно неподвижной оси (оси Эйлера). Достаточно полная библиография работ по данной проблеме приведена в работе [2]. В ней отмечено, что "наиболее детально задача оптимального управления угловым движением КА решена лишь для двух частных случаев — плоских вращений КА вокруг одной из главных центральных осей инерции и пространст-

венного вращения сферически симметричного КА. Вопросы создания эффективных режимов и алгоритмов управления ориентацией КА остаются актуальными и сегодня".

Примером применения полученных решений является алгоритм управления переориентацией КА "Ресурс-П" [3]. В целом алгоритм реализует программное вращение относительно оси Эйлера. Весь заданный интервал поворота состоит из трех участков: "разгона", движения с постоянной угловой скоростью и "торможения". Участки "разгона" и "торможения", в свою очередь, разбиты каждый на три промежутка. В первом из них движение совершается с линейно нарастающим (по модулю) ускорением, во втором ускорение постоянно, в третьем оно уменьшается (по модулю) до нуля. Непременным условием построения оптимальной программы управления угловым движением КА при переориентации является решение двухточечной краевой задачи.

Результаты синтеза дискретных систем управления, полученные в теории управления [4] с использованием как классического вариационного исчисления, так и принципа максимума, однозначно указывают на то, что для получения оптимальной траектории, переводящей систему из произвольного начального положения в начало координат, необходимо располагать набором некоторых дополнительных параметров, число которых равно размерности вектора состояния заданной системы. Эти параметры связаны с заданной системой и обладают определенной динамикой изменения вдоль траектории ее движения. Так, в случае применения метода синтеза на основе классического вариационного исчисления используют множители Лагранжа с сопряженными уравнениями Эйлера—Лагранжа для описания их динамики. В принципе максимума вводятся параметры сопряженной системы, динамика поведения которых описывается канониче-

скими уравнениями Гамильтона. Именно для определения этих вспомогательных параметров необходимо решать двухточечную краевую задачу.

Чтобы исключить необходимость решения двухточечной краевой задачи и построить замкнутую систему управления движением КА при переориентации в форме обратной связи, в настоящей работе поставлена и решена задача синтеза линейной по состоянию и управлению дискретной системы на основе разработанного автором и изложенного в работе [5] энергосберегающего алгоритма управления. Согласно этому алгоритму показателем качества системы выбран минимум следа ковариационной матрицы управления на каждом шаге. Необходимые вспомогательные параметры структурированы в форме вспомогательной системы. Совместно со структурой оптимального регулятора они задаются при постановке задачи. Энергосберегающий алгоритм управления оказался весьма конструктивным, поскольку заданный показатель качества системы является в то же время положительно определенной функцией Ляпунова, доставляющей системе условие асимптотической устойчивости в целом.

Проведено математическое моделирование синтезированной оптимальной замкнутой дискретной системы управления переориентацией на примере КА "Ресурс-П", в результате которого подтверждена эффективность предложенного метода. Для наглядности угловое положение КА задается углами вращения относительно связанных осей, а не кватернионами.

1. Постановка задачи оптимального управления

Пусть задана линейная по состоянию и управлению дискретная полностью управляемая система:

$$X_{i+1} = A_i X_i + B_i U_i, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (1.1)$$

где $X_i \in R^n$ — вектор состояния системы в n -мерном евклидовом пространстве в момент времени, соответствующий i ; $U_i \in R^r$ — вектор управлений в r -мерном евклидовом пространстве в тот же момент времени; A_i — матрица состояния системы, которая имеет размерность $n \times n$ и зависит от X_i ; B_i — матрица управлений, которая имеет размерность $n \times r$ и также зависит от X_i . Полагаем, что вектор состояния системы X_i обладает полной степенью наблюдаемости. Пусть также известно начальное состояние системы $X_0 \neq 0$.

Требуется найти регулятор, вырабатывающий последовательность управлений $U_0, U_1, U_2, \dots, U_i, U_{i+1}, \dots$, на значения которых не наложены ограничения, переводящую систему из произвольного начального состояния в заданное конечное состояние (начало координат) $X = 0$ за неограниченное число шагов и при этом минимизирующую заданный ниже показатель качества системы.

Пусть в нашем распоряжении имеется линейная по состоянию и управлению система, уравнение движения которой нам также известно:

$$\xi_{i+1} = C_i \xi_i + D_i U_i, \quad (1.2)$$

где $\xi_i \in R^n$ — вектор состояния системы также принадлежит n -мерному евклидовому пространству. Матрицы C_i и D_i имеют размерности матриц A_i и B_i соответственно и в общем случае могут зависеть от ξ_i . Назовем эту систему вспомогательной. Вспомогательная система управляется тем же вектором U_i , что и заданная система. Кроме того, потребуем, чтобы начальное состояние вспомогательной системы совпадало с начальным состоянием заданной системы: $\xi_0 = X_0$.

От матрицы C_i потребуем, чтобы невозмущенное движение вспомогательной системы было асимптотически устойчиво в целом. Порядок выбора матриц C_i и D_i изложен далее.

Закон управления с обратной связью выберем в линейной форме:

$$U_{i+1} = U_i + P_{i+1}(\tilde{X}_{i+1} - \xi_{i+1}), \quad (1.3)$$

т. е. управление на текущем шаге определяется в виде алгебраической суммы управления на предыдущем шаге и взвешенной разности векторов состояния заданной и вспомогательной систем на текущем шаге. Здесь P_{i+1} — весовая матрица, оптимальным образом взвешивающая разность между векторами состояний заданной и вспомогательной систем. Вектор состояния заданной системы определяется в результате измерений:

$$\tilde{X}_i = X_i + \varepsilon_i, \quad (1.4)$$

где X_i — истинное значение вектора состояния, ε_i — вектор случайных аддитивных погрешностей измерений типа централизованного дискретного белого шума:

$$M(\varepsilon_i) = 0; \quad M(\varepsilon_i \varepsilon_i^T) = K_\varepsilon; \quad M(\varepsilon_i \varepsilon_j^T) = 0. \quad (1.5)$$

Здесь M — знак математического ожидания; T — знак операции транспонирования; K_ε — ковариационная матрица погрешностей измерений, представляющая собой постоянную диагональную матрицу, диагональные элементы которой суть дисперсии погрешностей измерений компонент вектора состояния заданной системы.

Полагаем также, что выполняются равенства

$$M(\varepsilon_i X_i^T) = 0; \quad M(\varepsilon_i \xi_i^T) = 0. \quad (1.6)$$

Определим ковариационную матрицу управления на текущем шаге управления:

$$K_{U, i+1} = M(U_{i+1} U_{i+1}^T). \quad (1.7)$$

Критерием (показателем) качества, как следует из названия алгоритма, является минимум энергос затрат на управление на каждом шаге. Определим его через след ковариационной матрицы управления (сумму квадратов ее диагональных элементов), являющийся в соответствии с выражением (1.3) функцией весовой матрицы P_{i+1} :

$$\mathfrak{Z}(i) = M(U_{i+1}^T U_{i+1}) = \text{Tr}[K_{U,i+1}(P_{i+1})] \rightarrow \min, \quad (1.8)$$

где $\text{Tr}[\dots]$ — операция вычисления следа ковариационной матрицы управления $K_{U,i+1}$.

Идея предложенного подхода состоит в следующем. Если вспомогательная система благодаря выбору матрицы C_i движется в начало координат, то траектория движения заданной системы не будет значительно отклоняться от траектории движения вспомогательной системы благодаря весовой матрице P_{i+1} и, следовательно, также будет направлена в начало координат. При возрастании отклонения вектор управления будет возрастать и компенсировать это возросшее отклонение.

Матрица C_i определяется экспериментально путем подбора ее элементов для каждой конкретной задачи. В этой матрице заложена программа движения и его длительность. Регулярного алгоритма определения матрицы C_i пока не найдено.

Вспомогательная система играет роль ведущей системы, а заданная система — ведомой.

Таким образом, задача синтеза оптимального управления (1.3) в такой постановке сводится к отысканию оптимального выражения для весовой матрицы P_{i+1} системы.

2. Синтез оптимального управления

Оптимальное значение весовой матрицы P_{i+1} может быть найдено из необходимого условия минимума показателя качества (1.8), состоящего в том, что частная производная от следа ковариационной матрицы управления по искомой матрице P_{i+1} должна быть равна нулю:

$$\frac{\partial \text{Tr}[K_{U,i+1}(P_{i+1})]}{\partial P_{i+1}} = 0. \quad (2.1)$$

Вычислим ковариационную матрицу управления. Умножая текущий вектор управления U_{i+1} (1.3) в соответствии с (1.7) справа на его транспонированное значение с использованием выражений (1.1) и (1.2) и определив математическое ожидание, получим

$$\begin{aligned} K_{U,i+1} &= P_{i+1} A_i K_{X,i} A_i^T P_{i+1}^T + \\ &+ P_{i+1} C_i K_{\xi,i} C_i^T P_{i+1}^T + [P_{i+1}(B_i - D_i) + E] \times \\ &\times K_{U,i} [E + (B_i - D_i)^T P_{i+1}^T] + P_{i+1} K_{\varepsilon} P_{i+1}^T, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где E — единичная матрица; $K_{U,i}$ — значение ковариационной матрицы управления на предыдущем шаге. Выражение (2.2) получено в предположении, что все взаимно ковариационные матрицы векторов состояния и управления равны нулю:

$$M(X_i \xi_i^T) = 0; M(X_i U_i^T) = 0; M(\xi_i U_i^T) = 0.$$

Строго говоря, эти матрицы отличны от нулевых матриц, поэтому в результате такого синтеза может быть получено субоптимальное (приближенно оптимальное) решение. Однако, поскольку всякое оптимальное решение по определению есть приближенное решение (хотя бы в силу приближенности моделей движения) и введенные предположения лишь несколько увеличивают возможную погрешность оптимального решения, мы сохраним за полученным решением термин "оптимальное".

Полагаем также, что на основании весовой матрицы управления и ковариационной матрицы погрешностей измерений K_{ε} могут быть рассчитаны или заданы ковариационные матрицы состояний заданной и вспомогательной систем:

$$K_{X,i} = M(X_i X_i^T), K_{\xi,i} = M(\xi_i \xi_i^T). \quad (2.3)$$

Воспользовавшись правилами [6] дифференцирования следа матрицы по матрице, с использованием соотношения (2.2) получаем выражение для оптимальной весовой матрицы P_{i+1} :

$$\begin{aligned} P_{i+1} &= -K_{U,i} (B_i - D_i)^T [A_i K_{X,i} A_i^T + C_i K_{\xi,i} C_i^T + \\ &+ (B_i - D_i) K_{U,i} (B_i - D_i)^T + K_{\varepsilon}]^{-1}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Здесь показатель степени (-1) обозначает операцию обращения матрицы.

Наконец, подставив это оптимальное выражение в соотношение (2.2), получим далее выражение для ковариационной матрицы управления, уточненное на текущем шаге с учетом полученного оптимального значения весовой матрицы на этом шаге:

$$K_{U,i+1} = [P_{i+1}(B_i - D_i) + E] K_{U,i}. \quad (2.5)$$

Получением уравнений (2.4) и (2.5) исчерпывается решение задачи синтеза оптимального управления линейной по состоянию и управлению дискретной системой.

В работе [5] показано, что для выполнения необходимого условия асимптотической устойчивости в целом расширенной системы, включающей рассматриваемую и вспомогательную системы, должно выполняться условие отрицательного значения следа приращения ковариационной матрицы управления на каждом шаге:

$$\text{Tr}[\Delta r_{U,i+1}] = \text{Tr}[P_{i+1}(B_i - D_i) K_{U,i}] < 0. \quad (2.6)$$

Выполнение условия (2.6) можно контролировать в ходе самого процесса управления.

Значение начального вектора управления U_0 определяется из условий решаемой задачи. Как правило, оно выбирается равным нулю. В работе [5], посвященной задаче оптимального подъема геофизической ракеты В-2А на максимальную высоту, начальный вектор управления (тяга двигателя) должен быть достаточным для отрыва ракеты от стартового стола.

3. Уравнения невозмущенного углового движения КА "Ресурс-П"

Невозмущенное угловое движение КА как твердого тела относительно центра масс O в связанной системе координат (ССК) $Oxzy$, оси которой в общем случае не совпадают с главными центральными осями инерции, описывается динамическим уравнением Эйлера в векторной форме:

$$\frac{dK}{dt} + \omega \times K = 0, \quad (3.1)$$

где K — вектор кинетического момента КА с установленными на нем гироскопами; ω — вектор угловой скорости КА, знак $\times$ обозначает операцию векторного произведения векторов. Вектор кинетического момента K равен сумме кинетических моментов КА и гироскопов:

$$K = K_{KA} + K_G = J\omega + \sum_{k=1}^m K_{Gk}, \quad (3.2)$$

где J — известный тензор инерции КА; K_{Gk} — вектор кинетического момента k -го гироскопа из комплекта m гироскопов. Для его производной по времени, равной управляющему моменту M_k , развиваемому k -м гироскопом, справедливо соотношение

$$\frac{dK_{Gk}}{dt} = -M_k. \quad (3.3)$$

Здесь знак "минус" учитывает тот факт, что за счет реакции опор приращение кинетического момента КА по какой-либо оси противоположно по знаку приращению проекции кинетического момента гироскопа на ту же ось, вызванному управляющим моментом гироскопа.

Значение K_{KA} кинетического момента КА определяется произведением тензора инерции J КА на вектор ω его угловой скорости. Значение момента M_k , развиваемого гироскопом, определяется параметрами гироскопа: кинетическим моментом ротора, положением его оси прецессии в ССК, угловым положением ротора относительно оси прецессии и угловой скоростью прецессии. Детализацию этих параметров оставим до рассмотрения примера.

В результате геометрического сложения векторы (3.3) дают суммарный вектор управления по связанным осям КА:

$$M = [M_1, M_2, M_3]^T. \quad (3.4)$$

Учитывая введенные обозначения, дифференциальное уравнение углового движения КА (3.1) можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\omega}{dt} = -J^{-1}\omega \times K + J^{-1}M. \quad (3.5)$$

Определим вектор состояния системы, включающий углы поворота КА по крену, рысканию и тангажу относительно осей Ox , Oy , Oz ССК из исходного положения, заданного в некотором инерциальном базисе, и угловые скорости вращения КА относительно тех же осей:

$$X(t) = [\varphi_1(t), \varphi_2(t), \varphi_3(t), \omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t)]. \quad (3.6)$$

С использованием этого вектора угловое движение КА можно записать в форме линейного дифференциального уравнения в матричной форме:

$$\dot{X}(t) = R(X, t)X(t) + GM(t). \quad (3.7)$$

Ограничения на величину компонент управляющего вектора $M(t)$ не накладываются.

Представим матрицы $R(X, t)$ и G в явной форме. Для этого введем обозначения

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}; E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R(X, t) = \begin{bmatrix} 0 & E \\ 0 & F \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} 0 \\ J^{-1} \end{bmatrix};$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{44} & F_{45} & F_{46} \\ F_{54} & F_{55} & F_{56} \\ F_{64} & F_{65} & F_{66} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} m_{12}k_3 - m_{13} & k_2 - m_{11}k_3 + m_{13}k_1 & m_{11}k_2 - m_{12}k_1 \\ m_{22}k_3 - m_{23} & k_2 - m_{21}k_3 + m_{23}k_1 & m_{21}k_2 - m_{22}k_1 \\ m_{32}k_3 - m_{33} & k_2 - m_{31}k_3 + m_{33}k_1 & m_{31}k_2 - m_{32}k_1 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Проинтегрировав матричное уравнение (3.7) по известной формуле Коши на малом временном интервале $\Delta t = 0,1$ с от i до $i + 1$, получим уравнение углового движения КА в конечных разностях в рекуррентной линейной форме:

$$X_{i+1} = A_i X_i + B_i M_i. \quad (3.9)$$

Здесь матрицы A_i и B_i зависят от вектора состояния X_i и имеют вид:

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 + \Delta t F_{44} & \Delta t F_{45} & \Delta t F_{46} \\ 0 & 0 & 0 & \Delta t F_{54} & 1 + \Delta t F_{55} & \Delta t F_{56} \\ 0 & 0 & 0 & \Delta t F_{64} & \Delta t F_{65} & 1 + \Delta t F_{66} \end{bmatrix}; \quad (3.10)$$

$$B_i = \begin{bmatrix} (\Delta t^2/2)EJ^{-1} \\ [\Delta t E + (\Delta t^2/2)F]J^{-1} \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Полученные соотношения использованы ниже для математического моделирования задачи оптимального управления угловым движением КА "Ресурс-П" при переориентации.

4. Синтез оптимальной энергосберегающей переориентации КА "Ресурс-П"

Проведен синтез оптимальной энергосберегающей переориентации КА ДЗЗ "Ресурс-П" из заданного начального углового положения в начало координат. Угловые скорости в начале и в конце поворота приняты нулевыми.

Тензор инерции КА "Ресурс-П" принят равным

$$J = \begin{bmatrix} 22 & 147 & 144 & 321 \\ 0 & 10 & 213 & 752 \\ 0 & 0 & 24 & 497 \end{bmatrix}.$$

Здесь размерность осевых и центробежных моментов инерции — Н · м · с².

В состав системы управления движением КА "Ресурс-П" входят шесть гиродинов с кинетическим моментом ротора каждого из них 250 Н · м · с.

Комплект из шести гиродинов образует гиросистему из трех коллинеарных пар гиродинов с расположением осей прецессии каждой пары по конусу с осью вдоль оси Oy ССК и углом α полураствора конуса 30°. Параллельность осей прецессии гиродинов в каждой паре позволяет рассматривать их векторы кинетических моментов расположенными в одной плоскости, перпендикулярной оси прецессии.

Свяжем с гиродином приборную систему координат (ПСК) $Ox_{п}y_{п}z_{п}$. Ось прецессии ротора гиродина совпадает с осью $Oy_{п}$ ПСК. Положение ПСК гиродинов относительно ССК определим двумя поворотами. Первый поворот совершается вокруг оси Oy ССК на угол ψ . Для первой пары гиродинов $\psi_{1,2} = 0^\circ$, для второй пары — $\psi_{3,4} = 120^\circ$, для третьей — $\psi_{5,6} = 240^\circ$. Второй поворот совершается вокруг оси $Oz_{п}$ на угол $\alpha = 30^\circ$ для всех пар гиродинов.

Угол прецессии роторов гиродинов обозначим β . Отсчет углов β ведется при повороте ротора от оси $Ox_{п}$. Угол положителен при повороте относи-

тельно оси прецессии против часовой стрелки и отрицателен — при повороте по часовой стрелке, если смотреть с положительного направления оси $Oy_{п}$.

Примем начальные углы β поворота роторов гиродинов равными следующим значениям:

$$\beta_{10} = 315^\circ; \beta_{20} = 225^\circ; \beta_{30} = 315^\circ; \\ \beta_{40} = 225^\circ; \beta_{50} = 315^\circ; \beta_{60} = 225^\circ.$$

Принятые углы установки гиродинов и начальные углы β удобны тем, что при этом обеспечивается высокая надежность гиросилового комплекса и при синхронной раскрутке роторов гиродинов на КА не действуют возмущающие моменты.

Расчет параметров оптимальной переориентации проводится, как уже было принято выше, из условия минимизации следа ковариационной матрицы управления. Текущее значение ковариационной матрицы управления при этом имеет вид

$$K_{M,i+1} = M(M_{i+1}M_{i+1}^T).$$

Для принятой системы гиродинов зависимость компонент вектора момента, действующего на корпус k -го гиродина, от скорости прецессии $\dot{\beta}_k$ этого гиродина можно описать соотношениями

$$M_{1k} = -H(\sin\beta_k \cos\psi_k \cos\alpha + \cos\beta_k \sin\psi_k)\dot{\beta}_k; \\ M_{2k} = -H\sin\beta_k \sin\alpha \dot{\beta}_k; \\ M_{3k} = H(\sin\beta_k \sin\psi_k \cos\alpha - \cos\beta_k \cos\psi_k)\dot{\beta}_k. \quad (4.1)$$

Записывая соотношения (4.1) в сжатой форме

$$M_{1k} = S_{1k}\dot{\beta}_k; M_{2k} = S_{2k}\dot{\beta}_k; M_{3k} = S_{3k}\dot{\beta}_k$$

и вводя шестимерный вектор скоростей прецессии роторов гиродинов

$$\dot{\beta}_i = [\dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2, \dots, \dot{\beta}_6]^T, \quad (4.2)$$

суммарный вектор управляющего момента можно представить в виде матричной функции вектора скоростей прецессии

$$M_i = S_i \dot{\beta}_i. \quad (4.3)$$

Здесь

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{11}, S_{12}, \dots, S_{16} \\ S_{21}, S_{22}, \dots, S_{26} \\ S_{31}, S_{32}, \dots, S_{36} \end{bmatrix}_i. \quad (4.4)$$

Поскольку матрица (4.4) является прямоугольной (ее размерность 3×6), одним из вариантов определения вектора скоростей прецессии (4.2), удовлетворяющим (4.3), является использование псевдообратной матрицы $\tilde{S}_i$ [7]:

$$\dot{\beta}_i = \tilde{S}_i M_i = S_i^T (S_i S_i^T)^{-1} M_i. \quad (4.5)$$

Определенный по этой формуле вектор скоростей прецессии гиродинов в реальной системе управле-

ния должен выдаваться в качестве управляющего параметра в систему гироскопов. Система управления обеспечивает исполнение заданного значения скорости прецессии каждого гироскопа, благодаря чему создается необходимый управляющий момент (4.3).

К этому уравнению следует добавить соотношение для учета изменения угла прецессии k -го ($k = 1, 2, \dots, 6$) гироскопа на одном шаге расчетов

$$\beta_{k, i+1} = \beta_{k, i} + \dot{\beta}_{k, i} \Delta t.$$

Вектор скоростей прецессии роторов гироскопов (4.5) обеспечивает формирование оптимального управляющего вектора момента, определенного в результате решения задачи оптимальной переориентации.

Для проведения численных расчетов в соответствии с полученными результатами заданы следующие исходные параметры:

- начальные значения векторов состояния заданной и вспомогательной систем

$$X_0 = \xi_0 = [110^\circ; 45^\circ; 45^\circ; 0; 0; 0];$$

- значения ковариационных матриц состояния заданной и вспомогательной систем (2.3) приближенно приняты постоянными и равными диагональным матрицам с диагональными элементами 1 и $0,01 \text{ с}^{-2}$ для углов и угловых скоростей соответственно;
- значения диагональных элементов ковариационной матрицы погрешностей измерений (2.5) приняты равными $(3 \cdot 10^{-4})^2$ и $(7 \cdot 10^{-6})^2 \text{ с}^{-2}$ также для углов и угловых скоростей соответственно;
- значения диагональных элементов начальной диагональной ковариационной матрицы управления K_{M0} (1.7) размерности 3×3 приняты равными $(5 \text{ кН} \cdot \text{м})^2$.

С учетом концепции построения замкнутой системы с обратной связью, отсчет значений векторов состояния заданной и вспомогательной систем в каждый момент времени в соотношении (1.3) ведется относительно конечного углового положения КА, принимаемого за начало координат.

Матрица состояния вспомогательной системы C_i выбрана в следующем виде:

$$C_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ -f_{1i} & 0 & 0 & 1-f_{2i} & 0 & 0 \\ 0 & -f_{1i} & 0 & 0 & 1-f_{2i} & 0 \\ 0 & 0 & -f_{1i} & 0 & 0 & 1-f_{2i} \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Здесь

$$f_{1i} = 2,5 \cdot 10^{-5}(1 + 5 \cdot 10^{-3}i);$$

$$f_{2i} = 0,01(1 + 2,5 \cdot 10^{-4}i)$$

— функции, зависящие от номера i шага расчета. Длительность одного шага по времени Δt принята равной 0,1 с.

Что касается матрицы D_i , то полагаем, что она удовлетворяет равенству: $D_i = -B_i$.

Как показано ниже, выбранные функции достаточно эффективно обеспечивают движение вспомогательной системы в начало координат. Асимптотическая устойчивость в целом невозмущенного движения вспомогательной системы с выбранной матрицей C_i подтверждена ниже численными расчетами функции Ляпунова специального вида.

Приведенные здесь значения параметров использованы при проведении математического моделирования процесса оптимальной переориентации.

5. Результаты математического моделирования оптимальной энергосберегающей переориентации КА "Ресурс-П"

При проведении расчетов начальный вектор управления принят нулевым. На рис. 1 приведены результаты расчетов, а также графики изменения углов и угловых скоростей заданной и вспомогательной систем в функции номера i шага расчета.

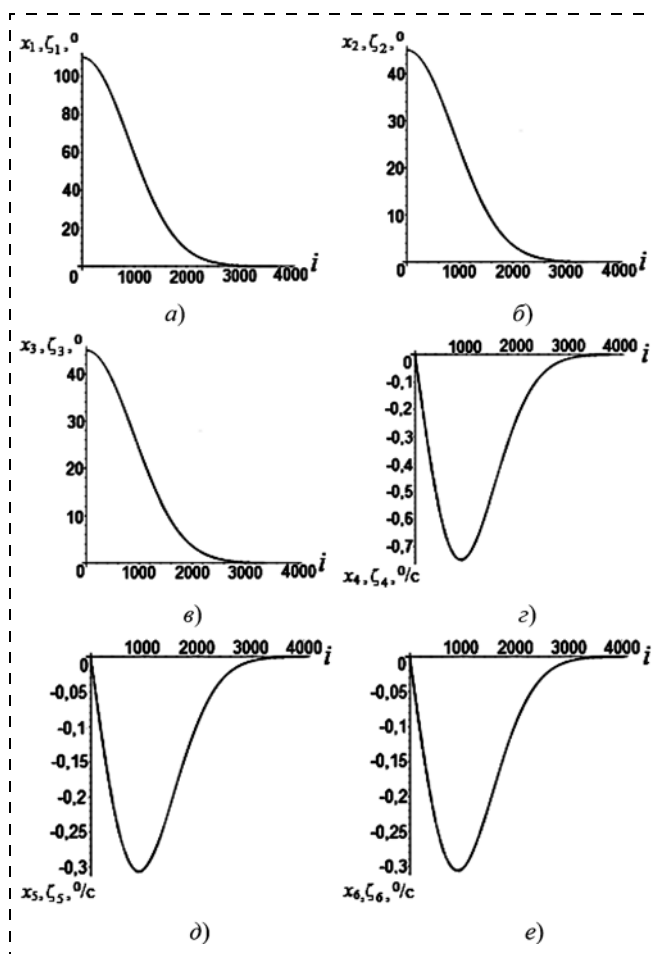


Рис. 1. Графики изменения: а — x_1 и ζ_1 ; б — x_2 и ζ_2 ; в — x_3 и ζ_3 ; г — x_4 и ζ_4 ; д — x_5 и ζ_5 ; е — x_6 и ζ_6

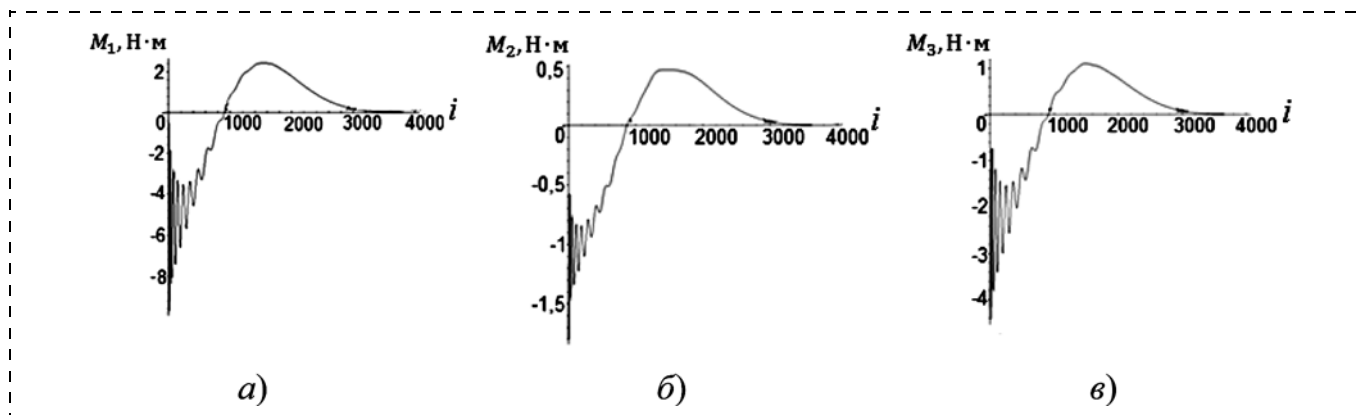


Рис. 2. Графики изменения оптимальных моментов:
а — M_1 ; б — M_2 ; в — M_3

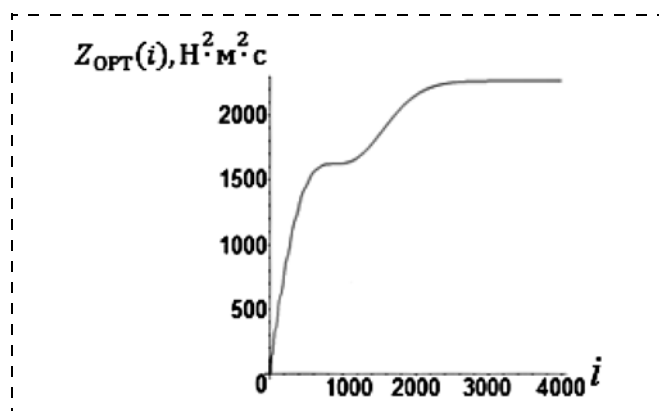


Рис. 3. График нарастания оптимального показателя качества $Z_{OPT}(i)$

Видно, что так как на момент окончания поворота погрешности по углам и по угловой скорости не должны превышать соответственно 0 , 2° и $0,02^\circ/\text{с}$, к моменту времени 300 с параметры углового движения КА соответствуют требуемым на момент окончания поворота. Отсюда следует, что длительность рассматриваемого поворота равна 300 с.

При этом движение КА достаточно точно повторяет движение вспомогательной системы, в особенности в части углов. Графики изменения соответствующих компонент векторов состояния задан-

ной и вспомогательной систем практически не отличаются друг от друга.

Графики оптимальных управляющих моментов по связанным осям КА от суммарного действия гироскопов приведены на рис. 2. Обращает на себя внимание колебательный характер действия управляющих моментов на начальном этапе поворота.

Проведем оценку эффективности предложенного решения по показателю качества (1.8), использованному в процессе синтеза оптимальной системы. В соответствии с изложенным в статье методом эффективность системы определяется значением накопленного на всем временном интервале поворота показателя качества:

$$z_{OPT(N)} = \sum_{i=0}^{N-1} (M_i^T M_i \Delta t). \quad (5.1)$$

График нарастания $Z_{OPT}(i)$ в процессе оптимального поворота приведен на рис. 3. Суммарное накопленное за поворот значение показателя качества в приведенном примере составляет $2150 \text{ Н}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Для оценки эффективности предложенного метода управления при переориентации КА по сравнению с методом, реализованным на КА ДЗЗ "Ресурс-П" и названным штатным, проведено сравнение графиков управляющих моментов и значение накопленного за поворот показате-

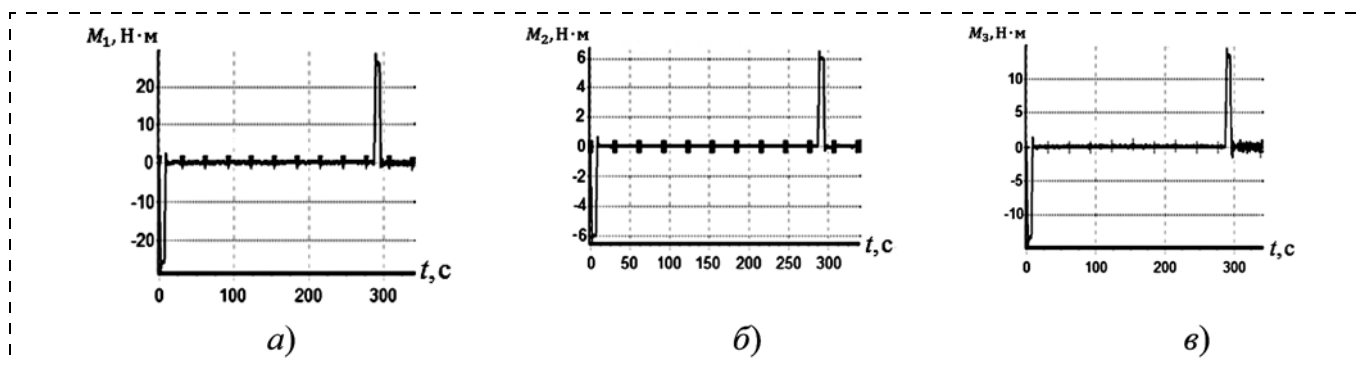


Рис. 4. Графики изменения штатных моментов:
а — M_1 ; б — M_2 ; в — M_3

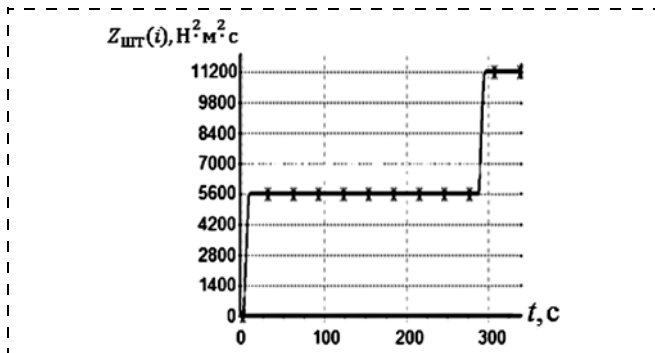


Рис. 5. График нарастания штатного показателя качества $z_{шт}(i)$

ля качества (5.1) при оптимальном управлении с соответствующими штатными графиками, приведенными на рис. 4, 5. Штатные графики получены для тех же начальных и конечных условий поворота и для заданного времени поворота 300 с. Графики подтверждают эйлеров характер штатного поворота. (Графики любезно предоставлены автору одним из разработчиков системы управления движением КА "Ресурс-П" А. А. Давыдовым.)

В соответствии с рис. 5 накопленный показатель качества за аналогичный поворот КА в штатном варианте составляет $Z_{шт} = 11\,200 \text{ Н}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}$.

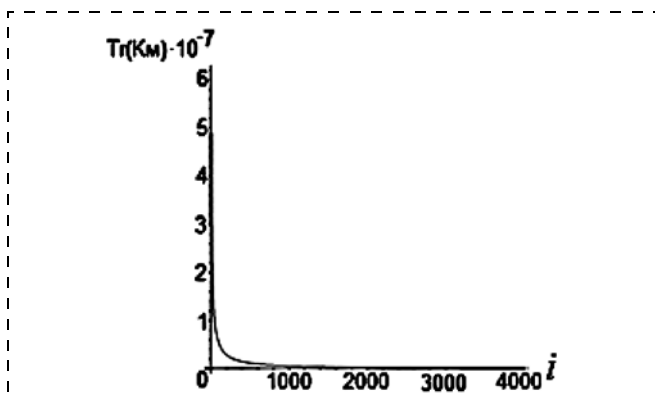


Рис. 6. График изменения следа ковариационной матрицы управления

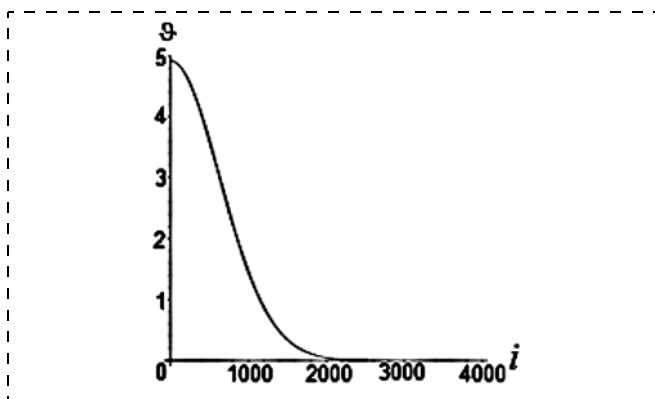


Рис. 7. График изменения функции Ляпунова ϑ

Отсюда следует, что значение накопленного показателя качества на управление КА в оптимальном варианте снижено по сравнению со штатным вариантом. Это подтверждает эффективность предложенного оптимального управления.

Вместе с тем, из сопоставления графиков (см. рис. 2) осевых управляющих моментов при оптимальном повороте с соответствующими графиками (см. рис. 4) моментов при штатном повороте, совершаемом КА "Ресурс-П" в тех же условиях, следует, что значения управляющих моментов также различаются. Следовательно, характер оптимального углового движения КА отличается от характера штатного движения (вращение вокруг оси Эйлера).

На рис. 6 представлен график изменения следа ковариационной матрицы управления (1.8) в процессе рассматриваемого оптимального поворота КА "Ресурс-П". След матрицы, в чем несложно убедиться, является функцией Ляпунова для рассматриваемой системы. График представляет собой положительную, монотонно убывающую функцию. Отсюда ясно, что необходимое условие теоремы Ляпунова — отрицательное значение приращения этой функции на каждом шаге управления — выполнено. Следовательно, асимптотическая устойчивость в целом рассматриваемой системы обеспечена.

Для подтверждения асимптотической устойчивости в целом невозмущенного движения вспомогательной системы на рис. 7 представлен полученный в результате расчетов график изменения в процессе неуправляемого движения КА следующей функции Ляпунова:

$$\vartheta_i = (C_i^T \xi_i)^T (C_i \xi_i).$$

На основании графика и аналогичных заключений можно утверждать, что матрица C_i обеспечивает асимптотическую устойчивость в целом невозмущенного движения вспомогательной системы.

Наличие колебательного процесса в управляющих моментах в начале поворота вызвано отличием принятых нулевых значений этих моментов от необходимых оптимальных в этом случае значений и, как следствие, стремлением системы с обратной связью найти эти оптимальные значения в процессе самого движения. В конечном итоге система вырабатывает такие управляющие моменты, при которых отклонения в состояниях заданной и вспомогательной систем в процессе дальнейшего движения являются минимальными.

Для подтверждения этого утверждения достаточно провести расчет варианта работы системы со следующими начальными управляющими моментами, отличными от нулевых: $M_{10} = -5,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $M_{20} = -1,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $M_{30} = -2,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Результаты расчета этого варианта представлены на приводимых графиках на рис. 8. Видно, что колебательный характер управляющих моментов исчез почти полностью.

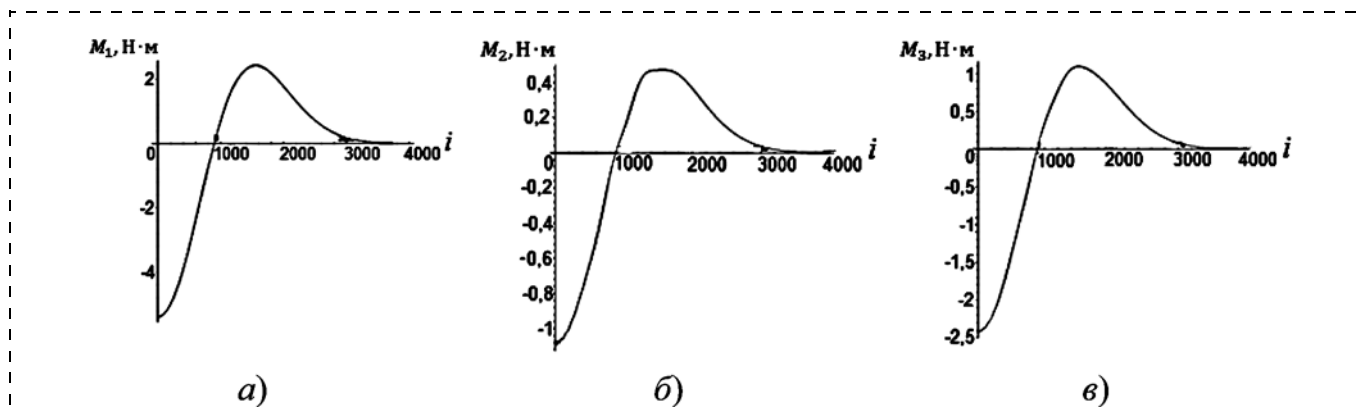


Рис. 8. Графики изменения оптимальных моментов при начальных управляющих моментах $M_{10} = -5,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $M_{20} = -1,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $M_{30} = -2,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$:
а — M_1 ; б — M_2 ; в — M_3

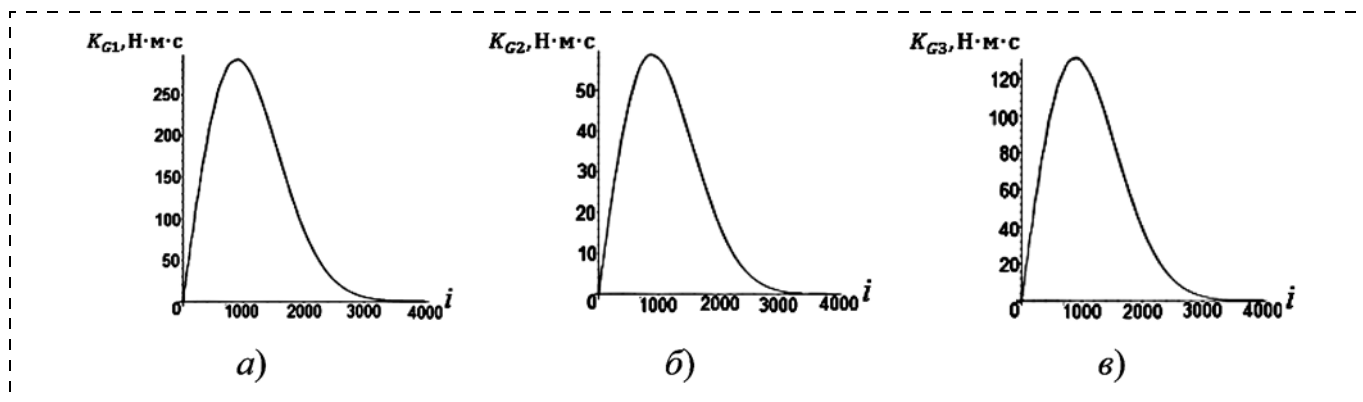


Рис. 9. Графики изменения составляющих гиринов:
а — K_{G1} ; б — K_{G2} ; в — K_{G3}

Для подтверждения качества управления на рис. 9 приведены графики изменения в процессе поворота составляющих вектора кинетического момента системы гиринов. Из графиков следует, что по окончании поворота суммарный вектор кинетического момента гиринов возвращается после поворота к нулевому значению.

Таким образом, поставленная в статье задача решена.

Заключение

Разработан оптимальный по энергозатратам алгоритм управления линейной по состоянию и управлению дискретной системой в форме обратной связи. Алгоритм основан на применении вспомогательной системы заданной структуры с заданными свойствами, минимизации энергозатрат на каждом шаге управления и при наличии зашумленных измерений. Продолжительность процесса управления в явном виде не задана. Отсутствуют ограничения на управляющие параметры. Разработана дискретная модель невозмущенного углового движения космического аппарата, управляемого с использованием инерциальных исполнительных органов

(гиринов). Приведены результаты математического моделирования разработанного алгоритма на примере задачи пространственной переориентации космического аппарата "Ресурс-П". Результаты математического моделирования подтвердили эффективность предложенного алгоритма.

Список литературы

1. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука, 1973.
2. Левский М. В. Об одном случае оптимального управления пространственной ориентацией космического аппарата // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 4. С. 115—130.
3. Юрий В. Е. Бортовые алгоритмы переориентации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // IV Всероссийская научно-техническая конференция "Актуальные проблемы ракетно-космической техники" (IV Козловские чтения). Матер. конф. 14—18 сентября 2015 г. Самара. Т. I. С. 418—424.
4. Справочник по теории автоматического управления. М.: Наука, 1987.
5. Петрищев В. Ф. Принцип минимума управления в задаче синтеза дискретных систем // 7-я Российская мультиконференция по проблемам управления. Матер. конф. "Управление в морских и аэрокосмических системах" (УМАС-2014). 7—9 сентября 2014 г. Санкт-Петербург. С. 64—73.
6. Ройтенберг Я. Н. Автоматическое управление. М.: Наука, 1978.
7. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1966.

Power-Efficient Algorithm for the Spacecraft Reorientation Control by Noisy Measurements

V. F. Petrishchev, mail@samspace.ru✉,

Progress Space-Rocket Centre, Samara, Korolev Research University of Samara

Corresponding author: **Petrishchev Vladimir F.**, D. Sc. Tech., Leading Researcher of Progress Space-Rocket Centre, Samara, Professor of Department of Theoretical Mechanics, Korolev Research University of Samara, e-mail: mail@samspace.ru

Received on October 21, 2016

Accepted on November 25, 2016

Traditionally, the problem of the satellite control, its reorientation from one angular position into another, is solved, as a rule, with the use of Pontryagin maximum principle. An example of its application is the algorithm for the control reorientation of the Resurs-P satellite equipped with the inertial effectors (control momentum gyros). On the whole, the algorithm implements the programmed rotations around the Euler axis. The whole interval of the given turn consists of three phases, including "speedup", motion at a constant angular velocity and "slowdown". "Speedup" and "slowdown" phases, in their turn, are also divided into three sub-phases. At the first of them the motion goes on with acceleration, increasing linearly in the absolute terms, at the second sub-phase the acceleration is constant, and at the third one, it decreases (in absolute terms) down to zero. Solution to a two-point boundary problem is a precondition for building of the optimal program for control of a satellite's angular motion in its reorientation. In order to eliminate the necessity for solving of the two-point boundary problem and to build a closed system for the satellite motion control in its reorientation in a feedback form, the present article poses and solves the task of synthesis of a discrete system, which is linear (both in state and control) and based on the power-efficient algorithm for control by the noisy measurements, developed by the author. According to the algorithm, the spur minimum of the covariance control matrix at each step was chosen as the system's quality index. The author introduced an auxiliary dynamic system and set its parameters. The optimal closed-loop control law was chosen in a linear form — control at the current step was defined as an algebraic sum of the control at the previous step and the weighted difference of the state vectors of the specified and auxiliary systems at the current step. The measurable state vector of the set system was fully observable and comprised random measurement errors, such as a centered discrete white noise. The reorientation time was not explicitly defined. There were no limitations for the control parameters. The power-efficient control algorithm proved to be quite constructive, since the specified quality index of the system was, at the same time, a positive definite Lyapunov function, which added a condition of the asymptotic stability to the whole system. The author developed a discrete model of the undisturbed angular motion of the Resurs-P spacecraft equipped with three pairs of the control momentum gyros and mathematically modeled the power-efficient control algorithm for the spacecraft reorientation. The results of modeling confirmed the efficiency of the proposed algorithm. For simplicity reasons, the angular position of the satellite is defined by the angles of rotation around the body axes, and not by the quaternions.

Keywords: algorithm, gyroscope, dynamics, quality, covariance, moment, precession, system, state, control

For citation:

Petrishchev V. F. Power-Efficient Algorithm for the Spacecraft Reorientation Control by Noisy Measurements, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 474—483.

DOI: 10.17587/mau.18.474-483

References

1. **Branets V. N., Shmyglevskii, I. P.** *Primenenie kvaternionov v zadachakh orientatsii tverdogo tela* (Application of Quaternions in Problems of Solid Body Orientation), Moscow, Nauka, 1973 (in Russian).
2. **Levskii M. V.** A Special Case of Spacecraft Optimal Attitude Control, *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2012, no. 4, pp. 115—130.
3. **Yurin, V. Ye.** Bortovye algoritmy pereorientatsii kosmicheskikh apparatov dstantsionnogo zondirovaniya zemli (Onboard Algorithms of Earth Remote Sensing satellites reorientation), *Proc. of IV All-Rus-*

sian scientific and technical conference "Actual problems of rocket and space technology" (IV Kozlov readings), September 14—18, 2015, Samara, vol. I, pp. 418—424 (in Russian).

4. **Krasovskii A. A.** *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* (Handbook on the Theory of Automatic Control), Moscow, Nauka, 1987 (in Russian).

5. **Petrishchev V. F.** *Printsip minimuma upravleniya v zadache sinteza diskretnykh system* (The Principle of Minimum Control in a Problem of Nonlinear Discrete System Synthesis), *7th Russian multiconference on control problems. Proc. of the 'Control in Marine and Aerospace Systems (UMAS-2014)' Conference*. September 7—9, 2014, Saint-Petersburg, pp. 64—73 (in Russian).

6. **Roytenberg Ya. N.** *Avtomaticheskoye upravlenie* (Automatic Control), Moscow, Nauka, 1978 (in Russian).

7. **Gantmakher F. R.** *Teoria matrits* (The Theory of Matrices), Moscow, Nauka, 1966 (in Russian).

А. В. Фомичев, канд. техн. наук, доц., a.v.fomichev@bmstu.ru,

Е. К. Ли, аспирант, elen.k.lee@student.bmstu.ru,

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Исследование точности аналитического решения задачи терминального наведения КА при посадке на поверхность Луны¹

Проведено исследование предложенного ранее авторами аналитического решения задачи терминального управления пространственным движением космического аппарата при посадке на поверхность Луны. В качестве шести параметров управления при получении аналитического решения были выбраны непосредственно параметры управления модулем и ориентацией вектора тяги и время, оставшееся до окончания процесса наведения. Терминальные условия заданы по положению и скорости космического аппарата. Приведены результаты математического моделирования процесса терминального наведения космического аппарата, совершающего посадку на поверхность Луны. Исследована точность предлагаемого аналитического решения для широкого диапазона начальных условий по положению и скорости космического аппарата в момент начала торможения, а также точность известных численно-аналитических решений поставленной задачи.

Ключевые слова: посадка на Луну, 3D-терминальное управление, наведение и управление посадочным модулем, анализ точности терминального управления

Введение

Задача мягкой посадки на поверхность Луны предполагает перевод космического аппарата (КА) из некоторой точки окололунной предпосадочной орбиты на поверхность Луны при выполнении ряда условий, определяющих устойчивость положения КА на грунте и функциональность полезной нагрузки после прилунения. В момент контакта любой из посадочных опор с поверхностью Луны отклонение продольной оси КА от вертикали не должно превышать $7...10^\circ$, вертикальная скорость КА не должна превышать $3...6$ м/с, остаточная горизонтальная скорость не должна превышать $1...2$ м/с [1, 2].

В рамках лунных программ предшествующего столетия мягкая посадка осуществлялась в экваториальных регионах Луны, которые отличаются равнинным рельефом, поэтому жесткие требования по точности наведения КА в определенную точку лунной поверхности к этим программам не предъявлялись. Так, концепция терминального управления, использованная в рамках программы "Сервейер" [3], обеспечивала промах относительно планируемой точки посадки порядка $5...30$ км. В рамках современных российских программ предполагается мягкая посадка в приполярных регионах Луны, рельеф которых характеризуется наличием большого числа возвышений и кратеров. В связи с этим возникает необходимость решения задачи терминального наведения КА в заданную точку окололунного пространства. Высокоточная посадка на поверхность Луны предполагает выполнение терминальных условий по координатам точки прилунения с погрешностью не более 100 м.

Для выбора параметров наведения в результате прогноза остающейся траектории движения в системах терминального управления могут использо-

ваться аналитические, численные и численно-аналитические (смешанные) методы. Аналитические методы предполагают использование конечных решений упрощенных уравнений движения и позволяют сократить время расчетов, однако погрешность наведения этих методов зависит от точности аналитического решения. Численные методы основаны на численном прогнозе остающейся траектории движения по более полным моделям движения КА, однако характеризуются более высокой вычислительной сложностью. Смешанные методы представляют собой комбинацию аналитического и численного прогноза траектории движения объекта [4].

Задача терминального управления плоским (2D) движением КА при посадке в заданную точку поверхности Луны может быть решена с использованием как аналитических (общий метод Черри [5, стр. 367—373], итеративный метод [5, стр. 373—378]), так и численных методов. Адаптивный алгоритм наведения КА при посадке на Луну, основанный на численном подходе к прогнозу траектории и решению краевой задачи в целях получения заданных терминальных условий движения, предложен в работах [2, 6].

Однако наличие высоких требований к точности выполнения посадки ограничивает возможность применения методов терминального управления плоским движением КА при посадке в заданную точку лунной поверхности. С учетом наличия погрешностей выведения КА в расчетную точку торможения и погрешностей оценки параметров траектории для выполнения высокоточной посадки целесообразно использовать методы терминального управления пространственным (3D) движением КА.

При решении задач терминального управления 3D-движением в чисто терминальной постановке (без процедур оптимизации) широко распространены два подхода: синтез управлений, реализующих заданное движение системы, и синтез управле-

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00046).

ний в заданном классе непрерывных функций [7]. Первый подход предполагает формирование номинальной траектории движения объекта, неизвестные параметры которой определяются из граничных условий, и расчет управлений, реализующих движение объекта по номинальной траектории. Такой подход был использован при посадке на Луну в рамках программы "Аполлон" [8, 9], при этом номинальную траекторию движения представляли в виде полиномиальных функций времени, оставшегося до окончания процесса наведения, а время наведения оценивали с использованием численных методов. Второй подход предполагает формирование управляющих воздействий как функций заданного вида с неизвестными параметрами. Такой подход планировали использовать при посадке лунного модуля в рамках программы "Созвездие" [9]: формировать управляющие ускорения предлагалось в виде полиномиальных функций времени при заранее заданном времени наведения. Необходимо отметить, что при подобных реализациях терминального управления существует необходимость пересчета управляющих ускорений в параметры управления модулем и ориентацией вектора реактивной тяги. Альтернативным вариантом является выбор непосредственно этих параметров в качестве параметров управления. В работе [5, стр. 378—386] получено численно-аналитическое решение задачи терминального управления 3D-движением для случая постоянной тяги и постоянного тормозного ускорения с использованием линейных программ изменения углов ориентации вектора тяги. Относительно параметра времени, оставшегося до окончания процесса наведения, аналитического решения получено не было, поэтому для его оценки использовались численные методы.

Алгоритм терминального управления 3D-движением КА, предлагаемый авторами в работе [10], также относится ко второму подходу и предполагает реализацию постоянного тормозного ускорения и линейных программ изменения углов тангажа и рыскания, но при этом является полностью аналитическим. Иными словами, аналитическое решение задачи терминального управления получено относительно шести параметров наведения, обеспечивающих выполнение шести терминальных условий по положению и скорости КА. Линейный закон изменения программных углов тангажа и рыскания при наведении динамических объектов является хорошо известным и применялся в ряде работ при управлении посадкой на поверхность Луны, например в работах [5, 6]. Как известно, линейные законы изменения углов ориентации вектора тяги близки к программам, при которых тангенс угла ориентации изменяется в соответствии с линейной функцией времени, а последние, в свою очередь, являются оптимальными с точки зрения расхода топлива [9].

Данная работа посвящена исследованию точности предложенного авторами в работе [10] аналитического

решения задачи наведения КА в заданную точку окололунного пространства. Погрешность предлагаемого решения сопоставляется с погрешностями численно-аналитического решения задачи терминального управления 3D-движением КА, изложенного в работе [5, стр. 378—386], и его модификации.

Краткая характеристика исследуемых методов наведения

В рамках данного исследования для сопоставления погрешности разработанного авторами метода терминального наведения [10] рассмотрен метод [5, стр. 378—386], далее — метод A^* , а также его модификация.

Рассмотрим посадочную систему координат, связанную с терминальной точкой (ПтСК): ось OZ направлена по местной вертикали, OX — на север по касательной к меридиану в точке посадки, OY дополняет систему до правой.

Вектор состояния КА в ПтСК представлен в следующем виде:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{r} \ \mathbf{V}]^T,$$

где $\mathbf{r} = [x \ y \ z]^T$ — радиус-вектор КА в ПтСК; $\mathbf{V} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$ — вектор скорости КА в проекциях на оси ПтСК.

Исследуемые методы терминального управления пространственным движением предполагают расчет следующих параметров наведения, обеспечивающих перевод КА из известного начального положения $\mathbf{X}_0$ в заданное терминальное положение $\mathbf{X}_T^*$ в ПтСК:

- программные значения углов рыскания ψ_0 и тангажа ϑ_0 и скоростей их изменения $\dot{\psi}$, $\dot{\vartheta}$;
- требуемое кажущееся ускорение $\ddot{W}$;
- время T_n , оставшееся до окончания процесса наведения.

Наведение КА осуществляется с постоянным тормозным ускорением. Программа управления по углам рыскания ψ и тангажа ϑ задана в виде линейных функций времени:

$$\psi_{\text{пр}}(t) = \psi_0 + \dot{\psi} t;$$

$$\vartheta_{\text{пр}}(t) = \vartheta_0 + \dot{\vartheta} t.$$

Предполагается, что система управления ориентацией и стабилизации КА в любой момент времени обеспечивает соответствие фактических значений углов рыскания ψ и тангажа ϑ их программным значениям:

$$\psi(t) = \psi_{\text{пр}}(t),$$

$$\vartheta(t) = \vartheta_{\text{пр}}(t).$$

В предлагаемом авторами решении задачи терминального управления пространственным движением КА, изложенном в работе [10], в результате интегрирования уравнений движения в ПтСК по-

лучены следующие аналитические соотношения для расчета шести параметров наведения (T_H , $\dot{W}$, ψ_0 , $\dot{\psi}$, ϑ_0 , $\dot{\vartheta}$):

$$\begin{aligned} T_H &= \frac{-a_3 - \sqrt{a_3^2 - 4a_2a_4}}{2a_2}; \\ \dot{W} &= \frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}{T_H}; \\ \psi_0 &= \arctan\left(\frac{A_y T_H - 3B_y}{A_x T_H - 3B_x}\right); \\ \dot{\psi} &= \frac{-3(A_x B_y - A_y B_x)}{(A_x T_H - 3B_x)^2 + (A_y T_H - 3B_y)^2}; \\ \vartheta_0 &= \arctan\left(\frac{A_z T_H - 2B_z}{A_x T_H - 3B_x}\right); \\ \dot{\vartheta} &= -\frac{3}{T_H} \frac{A_z T_H - 2B_z}{A_x T_H - 3B_x}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} a_2 &= (\dot{x}_T^* - \dot{x}_0)^2 + (\dot{y}_T^* - \dot{y}_0)^2 + (\dot{z}_T^* - \dot{z}_0)^2 - \\ &\quad - 4(\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2 + \dot{z}_0^2 + (\dot{z}_T^* - \dot{z}_0)g); \\ a_3 &= 8((x_T^* - x_0)\dot{x}_0 + (y_T^* - y_0)\dot{y}_0 + (z_T^* - z_0)\dot{z}_0); \\ a_4 &= -4((x_T^* - x_0)^2 + (y_T^* - y_0)^2 + (z_T^* - z_0)^2); \\ A_x &= \dot{x}_T^* - \dot{x}_0; \\ A_y &= \dot{y}_T^* - \dot{y}_0; \\ A_z &= \dot{z}_T^* - \dot{z}_0 + gT_H; \\ B_x &= x_T^* - x_0 - \dot{x}_0 T_H; \\ B_y &= y_T^* - y_0 - \dot{y}_0 T_H; \\ B_z &= z_T^* - z_0 - \left(\dot{z}_0 - \frac{gT_H}{2}\right) T_H; \end{aligned}$$

g — ускорение свободного падения на поверхности Луны.

При решении задачи терминального наведения в соответствии с методом А* иным образом была задана посадочная система координат (по местной вертикали направлена ось ОУ), уравнения движения КА записаны аналогично, и в результате их интегрирования получены следующие аналитические соотношения для расчета пяти парамет-

ров наведения ($\dot{W}$, ψ_0 , $\dot{\psi}$, ϑ_0 , $\dot{\vartheta}$) [5, стр. 381, форм. 8.182—183]:

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \frac{\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}}{T_H^2}; \\ \psi_0 &= \arcsin\left(\frac{1}{\dot{W}}\left(\frac{2}{T_H}A_z - \frac{6}{T_H^2}B_z\right)\right); \\ \dot{\psi} &= \frac{1}{\dot{W}\cos\psi_0}\left(-\frac{6}{T_H^2}A_z + \frac{12}{T_H^3}B_z\right); \\ \vartheta_0 &= \arcsin\left(\frac{1}{\dot{W}\cos\psi_0}\left(-\frac{2}{T_H}A_y + \frac{6}{T_H^2}B_y\right)\right); \\ \dot{\vartheta} &= \frac{1}{\dot{W}\cos\vartheta_0\cos\psi_0}\left(\frac{6}{T_H^2}A_y - \frac{12}{T_H^3}B_y + \right. \\ &\quad \left. + \dot{W}\dot{\psi}\sin\vartheta_0\sin\psi_0\right), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A_x &= \dot{x}_T^* - \dot{x}_0; \\ A_y &= \dot{y}_T^* - \dot{y}_0 + gT_H; \\ A_z &= \dot{z}_T^* - \dot{z}_0; \\ B_x &= x_T^* - x_0 - \dot{x}_0 T_H; \\ B_y &= y_T^* - y_0 - \left(\dot{y}_0 - \frac{gT_H}{2}\right) T_H; \\ B_z &= z_T^* - z_0 - \dot{z}_0 T_H. \end{aligned}$$

Полученные соотношения являются функциями времени T_H , оставшегося до окончания процесса наведения. Аналитическое решение относительно параметра T_H в методе А* получено не было, и предлагалось оценивать его численно, с использованием метода касательных.

В рамках данного исследования была разработана также модификация метода А*, в которой время T_H оценивается с использованием формулы [5, стр. 370, форм. 8.138], адаптированной для пространственного случая:

$$T_H = \frac{R}{V_0 + \frac{(y_0 - y_T^*)}{(V_0 + V_T^*)}g - 0,5E + \frac{E^2}{12c}},$$

где

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(x_T^* - x_0)^2 + (y_T^* - y_0)^2 + (z_T^* - z_0)^2}; \\ V_0 &= |\mathbf{V}_0|, V_T^* = |\mathbf{V}_T^*|, \\ E &= \sqrt{(\dot{x}_T^* - \dot{x}_0)^2 + \left(\dot{y}_T^* - \dot{y}_0 + \frac{2gR}{V_T^*}\right)^2 + (\dot{z}_T^* - \dot{z}_0)^2}; \end{aligned}$$

c — скорость истечения газов из сопла двигателя.

Моделирование процесса наведения КА в заданную точку окололунного пространства

Вышеупомянутые алгоритмы были реализованы авторами программно в среде *MATLAB*. Для исследования точности рассматриваемых методов был разработан тестовый модуль, с помощью которого было выполнено тестирование исследуемых решений задачи терминального наведения КА для широкого диапазона начальных условий в момент начала торможения.

Тестирование исследуемых решений заключалось в многократном (статистическом) моделировании процесса наведения КА в заданную точку окололунного пространства в ПтСК при различных начальных условиях. Начальные условия по положению $\mathbf{r}_0$ и скорости $\mathbf{V}_0$ выбирали случайным образом в заранее заданном диапазоне. Для слу-

чайного выбора параметров использовали встроенную функцию *unifrnd* в *MATLAB*, выполняющую генерацию псевдослучайных чисел по непрерывному равномерному распределению.

Вектор положения КА $\mathbf{r}_0$ в ПтСК при выборе начальных условий определим следующими тремя параметрами (рис. 1):

- 1) $|\mathbf{r}_{0l}|$ — модуль составляющей вектора $\mathbf{r}_0$ в горизонтальной плоскости *OYZ* ПтСК;
- 2) α — угол, характеризующий положение вектора $\mathbf{r}_{0l}$ в горизонтальной плоскости, отсчитывается от оси *OX* ПтСК;
- 3) h_0 — начальная высота КА.

Вектор скорости КА $\mathbf{V}_0$ при выборе начальных условий определим, в свою очередь, следующими параметрами (рис. 2):

- 1) $|\mathbf{V}_0|$ — модуль вектора скорости $\mathbf{V}_0$;

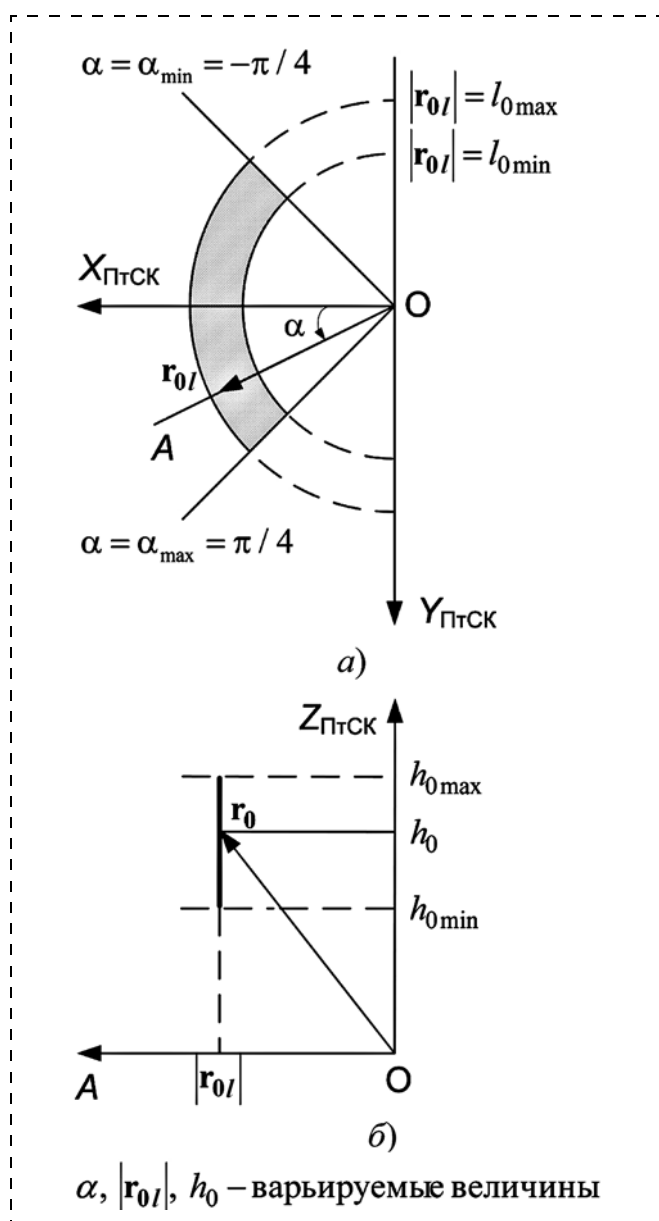


Рис. 1. Выбор начального положения КА в ПтСК

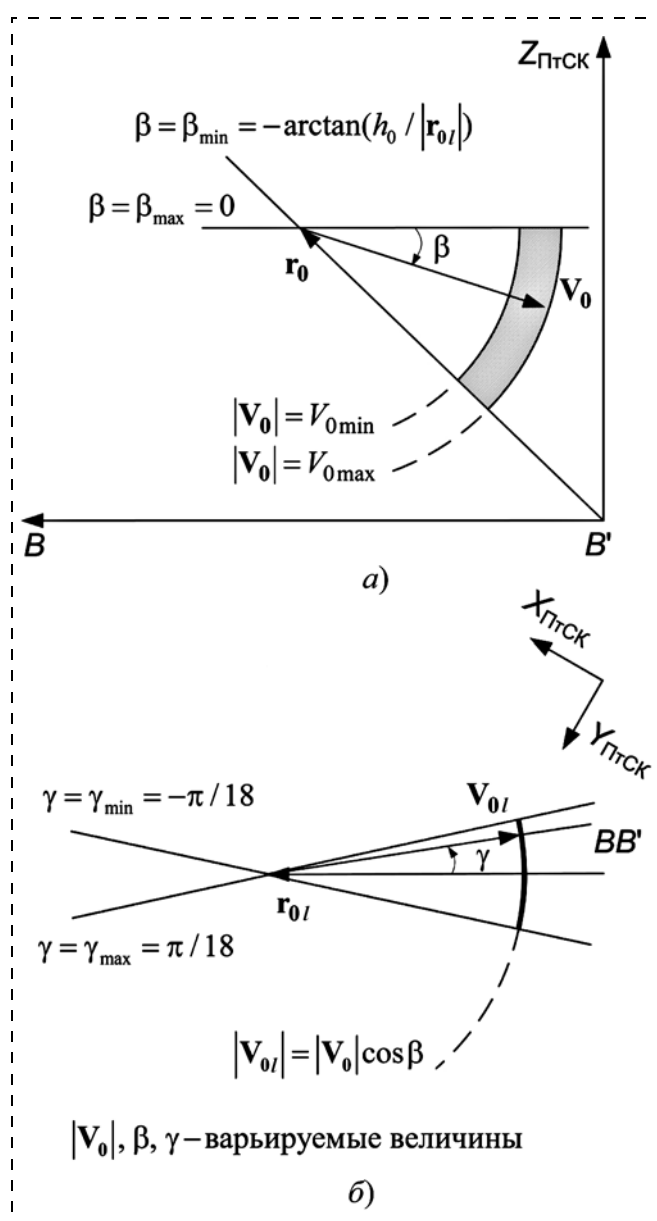


Рис. 2. Выбор начального вектора скорости КА в ПтСК

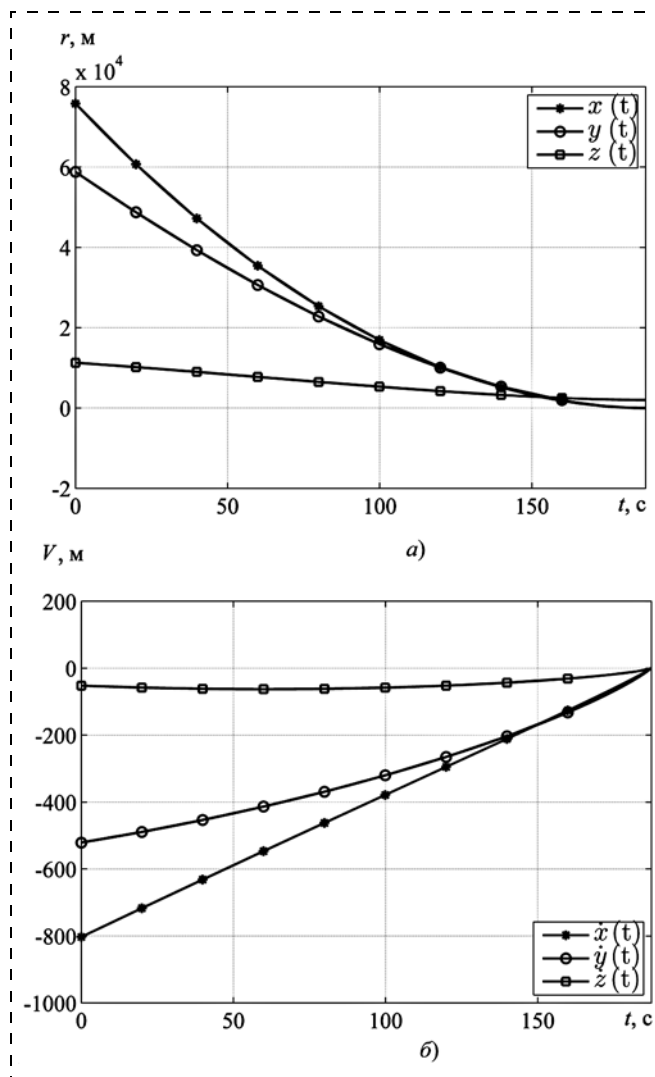


Рис. 3. Изменение параметров вектора состояния в ПтСК в процессе наведения по предлагаемому аналитическому методу: а — по положению; б — по скорости

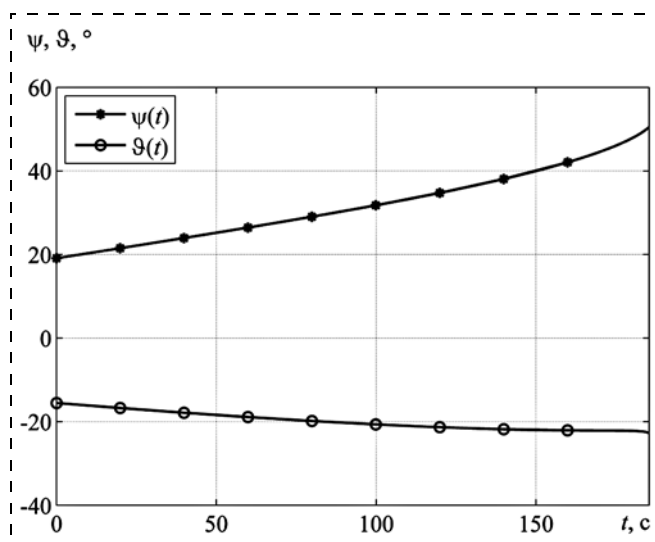


Рис. 4. Программные значения углов рыскания и тангажа в процессе наведения по предлагаемому аналитическому методу

2) β — угол между вектором $\mathbf{V}_0$ и горизонтальной плоскостью ПтСК;

3) γ — угол, характеризующий положение вектора $\mathbf{V}_0$ относительно вектора $\mathbf{r}_0$.

При выборе начальных условий были введены следующие ограничения:

$$|\mathbf{r}_0| \in [l_{0\min}, l_{0\max}];$$

$$\alpha \in [-\pi/4, \pi/4];$$

$$h_0 \in [h_{0\min}, h_{0\max}];$$

$$|\mathbf{V}_0| \in [V_{0\min}, V_{0\max}];$$

$$\beta \in [-\arctan(h_0/|\mathbf{r}_0|), 0];$$

$$\gamma \in [-\pi/18, \pi/18],$$

где $l_{0\min} = 0,95 \cdot 10^5$ м, $l_{0\max} = 1,05 \cdot 10^5$ м — ограничения на модуль вектора $\mathbf{r}_0$; $h_{0\min} = 0,95 \cdot 10^4$ м, $h_{0\max} = 1,15 \cdot 10^4$ м — ограничения на начальную высоту КА; $V_{0\min} = 0,94 \cdot 10^3$ м/с, $V_{0\max} = 0,96 \cdot 10^3$ м/с — ограничения на модуль вектора $\mathbf{V}_0$.

В качестве терминальных условий наведения $\mathbf{X}_T^* = [\mathbf{r}_T^* \ \mathbf{V}_T^*]^T$ при тестировании исследуемых решений были выбраны следующие параметры: $\mathbf{r}_T^* = [0 \ 0 \ 2 \cdot 10^3]^T$ м, $\mathbf{V}_T^* = [0 \ 0 \ 0]^T$ м/с. Иными словами, номинально процесс наведения должен закончиться на высоте 2 км над планируемой точкой посадки, при этом горизонтальная и вертикальная составляющие скорости КА должны обратиться в ноль.

Моделирование процесса наведения заключается в следующей циклической процедуре: проверка условия завершения наведения, запуск алгоритма расчета параметров наведения, интегрирование уравнений движения в соответствии с исследуемым методом. В качестве условия завершения наведения выбрано следующее: $T_H < h$, где T_H — время, оставшееся до окончания наведения, h — шаг интегрирования. В качестве метода интегрирования использовался метод Рунге—Кутты четвертого порядка.

Процесс изменения положения и скорости КА в ПтСК при терминальном наведении КА по предлагаемому авторами методу для некоторых начальных условий представлен на рис. 3, а и 3, б соответственно. На рис. 4 представлены изменения программных значений углов тангажа и рыскания в процессе наведения. Характер изменения программных значений углов ориентации близок к линейному закону. Фазовый портрет процесса наведения по предлагаемому методу на плоскости $\Delta V(\Delta r)$, где $\Delta V = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_T^*|$ и $\Delta r = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_T^*|$ — мгновенные рассогласования по скорости и положению КА, представлен на рис. 5.

На рис. 5 для тех же начальных условий также представлены аналогичные портреты процесса наведения с использованием двух других исследуемых методов. Анализ рисунка показывает, что про-

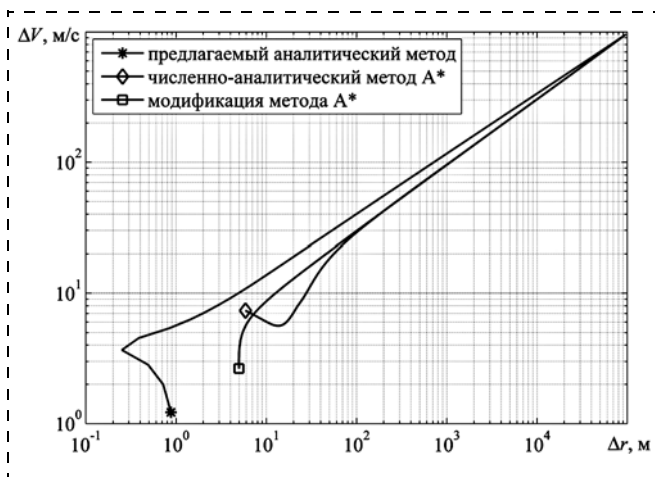


Рис. 5. Сопоставление погрешностей методов терминального наведения

цессы торможения с использованием метода А* и его модификации имеют сходный характер, и отличия в их отображении на фазовой плоскости $\Delta V(\Delta r)$ проявляются лишь при приближении на расстояние порядка 100 м к терминальной точке. Фазовый портрет процесса наведения с использованием предлагаемого метода отличается от двух других на протяжении всего процесса торможения более быстрым изменением рассогласования по положению по отношению к рассогласованию по скорости и характеризуется меньшей погрешностью наведения по обоим параметрам ΔV_T и Δr_T , где $\Delta V_T = |\mathbf{V}_T - \mathbf{V}_T^*|$ и $\Delta r_T = |\mathbf{r}_T - \mathbf{r}_T^*|$ — погрешности терминального наведения по конечной скорости и конечному положению соответственно.

Статистическое моделирование каждого из исследуемых методов проводили по выборке $N_{\max} = 10^4$ испытаний. В качестве характеристики каждого отдельного испытания выбраны следующие параметры:

1) признак выполнения условия "успешного" завершения процесса наведения. Под "успешным" будем понимать такой процесс, в результате которого КА приводится в заданную точку окололунной поверхности с погрешностью по конечному положению не более 200 м и конечной скорости — не более 10 м/с; в прочих случаях будем полагать, что процесс терминального наведения расходится;

2) погрешность наведения по конечной скорости ΔV_T ;

3) погрешность наведения по конечному положению Δr_T .

Распределения погрешностей терминального наведения по последним двум параметрам при использовании предлагаемого авторами аналитического метода приведены на рис. 6, а и 6, б, где N — число испытаний. Аналогичные распределения погрешностей наведения для двух других исследуемых методов представлены на рис. 7, а, б и рис. 8, а, б соответственно. Анализ рисунков показывает, что

выборки, полученные по результатам испытаний численно-аналитического метода А* и его модификации, характеризуются большим разбросом по сравнению с выборкой, полученной по результатам испытаний предлагаемого аналитического метода.

Результаты статистического моделирования процесса терминального наведения КА в заданную в ПтСК точку пространства при посадке на поверхность Луны приведены в таблице. Вероятность "успешного" завершения процесса наведения (отношение числа испытаний, в которых процесс наведения завершился успешно, к общему числу испытаний) при использовании метода А* и его модификации не превышает 83 и 94 % соответственно, в то время как успешным завершением процесса наведения при использовании предлагаемого аналитического решения характеризуются 100 % испытаний в выборке.

Результаты расчета математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО) погрешностей терминального наведения также представлены в таблице. Погрешность наведения, полученная в результате статистического моделиро-

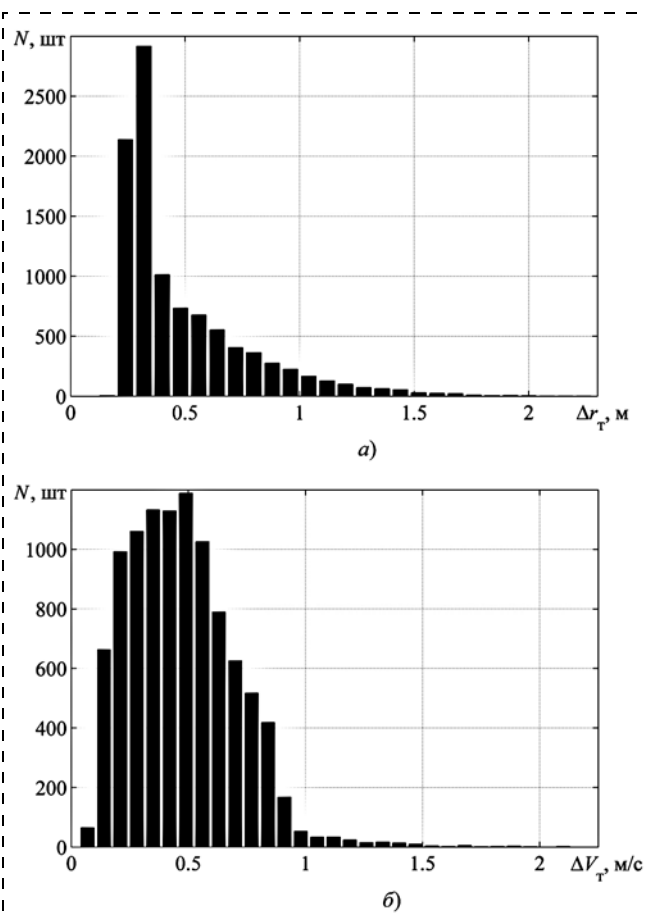


Рис. 6. Распределение погрешности терминального наведения по предлагаемому аналитическому методу: а — по конечному положению; б — по конечной скорости

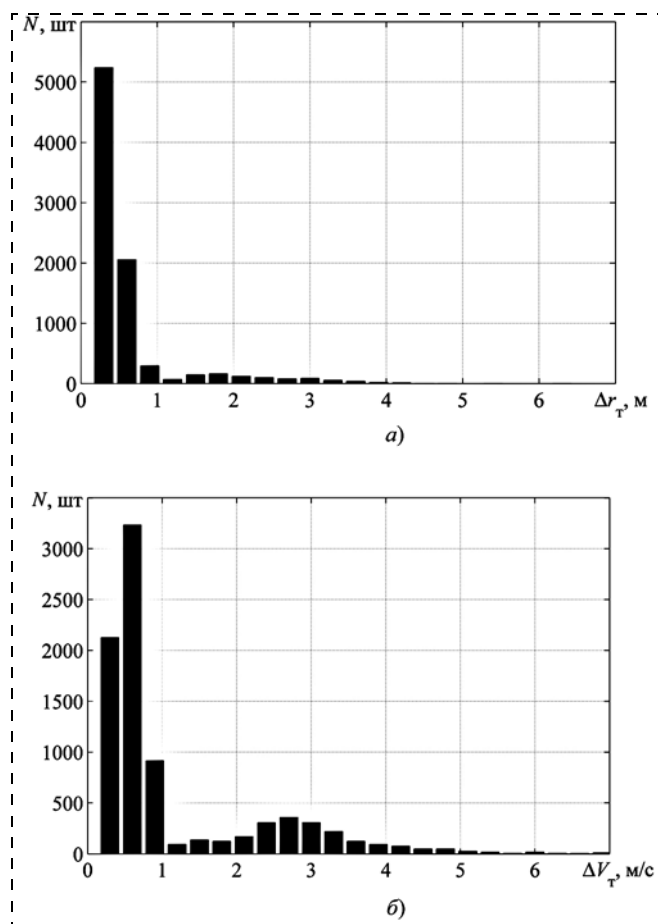


Рис. 7. Распределение погрешности терминального наведения по численно-аналитическому методу А*:
а — по конечному положению; б — по конечной скорости

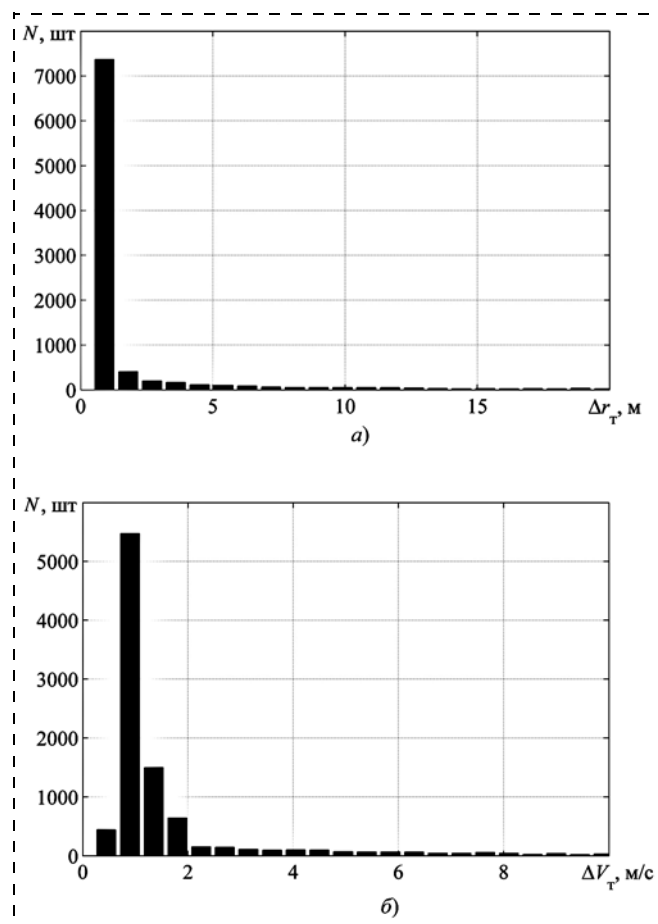


Рис. 8. Распределение погрешности терминального наведения по модификации метода А*:
а — по конечному положению; б — по конечной скорости

вания с использованием исследуемых методов, не превышает:

- для предлагаемого метода (3σ): $\Delta r_T \leq 1,31$ м, $\Delta V_T \leq 1,14$ м/с;
- для численно-аналитического метода А* (3σ): $\Delta r_T \leq 2,39$ м, $\Delta V_T \leq 4,63$ м/с;
- для модификации метода А* (3σ): $\Delta r_T \leq 22,06$ м, $\Delta V_T \leq 6,10$ м/с.

Анализ результатов показывает, что средние значения погрешностей Δr_T , полученных при использовании метода А* и предлагаемого авторами метода, являются близкими, однако метод А* су-

щественно уступает предлагаемому методу ввиду большего рассеяния характеристик погрешности наведения. Метод А* также уступает предлагаемому методу по значению вероятности "успешного" завершения процесса наведения. Использование модификации метода А* позволило повысить значение этой характеристики, однако обеспечило большее рассеивание погрешности по конечному положению Δr_T и конечной скорости ΔV_T . Предлагаемый авторами метод характеризуется наименьшей погрешностью наведения по обоим параметрам ΔV_T , Δr_T .

Результаты оценки погрешности наведения

Исследуемый метод	Вероятность "успешного" завершения процесса наведения, %	Параметры распределения характеристик погрешности наведения*			
		по конечному положению Δr_T , м		по конечной скорости ΔV_T , м/с	
		мат. ожидание	СКО	мат. ожидание	СКО
Предлагаемый авторами метод	100	0,4456	0,2883	0,4390	0,2336
Метод А*	82,9	0,4568	0,6455	1,0196	1,2049
Модификация метода А*	93,5	2,2596	6,6021	1,3355	1,5896

Примечание. Оценка параметров распределения выполнялась по серии испытаний, для которых было выполнено условие "успешного" завершения процесса наведения: $\Delta V \leq 10$ м/с, $\Delta r \leq 200$ м

Поскольку моделирование процесса наведения КА в заданную точку при посадке на поверхность Луны проводилось в ПтСК по тем же уравнениям движения, для которых были получены аналитические решения, приведенные в таблице оценки погрешностей наведения по конечному положению Δr_T и скорости ΔV_T представляют собой оценки погрешности исследуемых решений.

Заключение

Исследование предлагаемого авторами в работе [10] аналитического решения задачи терминального управления пространственным движением КА при посадке на поверхность Луны показало его высокую надежность: для широкого диапазона начальных условий по положению и скорости КА в момент начала торможения 100 % испытаний показали "успешное" завершение процесса наведения при использовании данного метода.

Погрешность наведения с использованием предлагаемого аналитического решения (3 σ) не превышает 1,31 м по положению и 1,14 м/с по скорости КА в конечный момент времени. Полученные оценки характеристик наведения превосходят соответствующие оценки для прочих рассматриваемых решений задачи терминального наведения в заданную точку окололунного пространства.

Полученные результаты говорят о принципиальной возможности использования предлагаемого метода для решения задачи высокоточной посадки на поверхность Луны. Исследование точности на-

ведения предлагаемого метода в условиях наличия неопределенностей и действия внешних возмущений при сходе с окололунной предпосадочной орбиты является следующим этапом работы.

Список литературы

1. **Cheng R. K., Pfeffer I.** Terminal Guidance System for Soft Lunar Landing // Guidance and Control. Edited by Robert E. Robertson... James S. Farrior, etc (Progress in Astronautics and Rocketry. vol. 8). Elsevier, 1962. P. 217—239.
2. **Лихачев В. Н., Сихарулидзе Ю. Г., Федотов В. П.** Этап основного торможения для выполнения мягкой посадки на поверхность Луны как один из видов коррекции траектории // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. 2012. № 5. С. 27—33.
3. **Cheng R. K.** Surveyor Terminal Guidance // Peaceful Uses of Automation in Outer Space. Springer US, 1966. С. 499—514.
4. **Сихарулидзе Ю. Г.** Баллистика и наведение летательных аппаратов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 407 с.
5. **Разыграев А. П.** Основы управления полетом космических аппаратов: Учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1990. 480 с.
6. **Лихачев В. Н., Сихарулидзе Ю. Г., Федотов В. П.** и др. Адаптивный терминальный алгоритм наведения для посадки на Луну // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. 2012. № 4. С. 92—102.
7. **Батенко А. П.** Системы терминального управления. М.: Радио и связь, 1984. 161 с.
8. **Klumpp A. R.** Apollo Lunar Descent Guidance // Automatica. 1974. Vol. 10, N. 2. P. 133—146.
9. **Moesser T. G.** Guidance and Navigation Linear Covariance Analysis for Lunar Powered Descent. 2010. All Graduate Theses and Dissertations. 654 p.
10. **Фомичев А. В., Ли Е. К.** Аналитический алгоритм терминального управления пространственным движением КА при посадке на поверхность Луны // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 6. С. 423—431.

Accuracy Analysis of the Analytical Solution for the Lunar Lander Terminal Guidance Problem

A. V. Fomichev, a.v.fomichev@bmstu.ru, **E. K. Li**, elen.k.lee@student.bmstu.ru✉, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Li Elena K.**, Assistant Professor, Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: elen.k.lee@student.bmstu.ru

Received on March 24, 2016

Accepted on April 04, 2017

An analysis of the accuracy and reliability of the proposed analytical solution for the lunar lander terminal guidance problem was carried out. The analytical solution for 3D terminal guidance problem was obtained for a constant acceleration trajectory and thrust vector orientation programs, which are essentially linear with time. In order to achieve 6 terminal conditions (position and velocity terminal vector components) 6 guidance law parameters were used: time-to-go, braking deceleration, initial pitch angle and pitch rate, initial yaw angle and yaw rate. The simulation results of the lunar lander terminal guidance using the proposed analytical solution were presented. The analysis of the proposed terminal guidance scheme and some similar schemes were carried out by mathematical modeling of the landing maneuver from a certain initial state to the desired spot near the lunar surface. By varying the initial position and the velocity parameters, when the terminal point was fixed, the statistic characteristics of the terminal guidance solution errors in the terminal position and velocity were estimated. An analysis of the simulation results validates the basic performance of the proposed terminal guidance scheme for the lunar pinpoint landing. Estimates of the terminal guidance accuracy for the proposed scheme exceed the corresponding estimates for the alternative considered schemes. The next phase of this research will be intended for studying the influence of variations in the initial prelanding orbit parameters (obliquity, ascending node longitude, argument of periapsis, periapsis height, apoapsis height) on the terminal guidance accuracy.

Keywords: lunar pinpoint landing, 3D terminal guidance, lander guidance and control, terminal guidance accuracy analysis

Acknowledgements: The study was carried out due to a grant from the Russian Science Foundation (project No. 14-11-00046).

For citation:

Fomichev A. V., Li E. K. Accuracy Analysis of the Analytical Solution for the Lunar Lander Terminal Guidance Problem, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 484—492.

DOI: 10.17587/mau.18.484-492

References

1. **Cheng R. K., Pfeffer I.** Terminal Guidance System for Soft Lunar Landing, *Guidance and Control*. Edited by Robert E. Roberson (Progress in Astronautics and Rocketry. vol. 8), Elsevier, 1962, pp. 217—239.
2. **Lihachev V. N., Siharulidze Ju. G., Fedotov V. P.** *Vestnik FGUP NPO n. a. S. A. Lavochkina*, 2012, no. 5, pp. 27—33 (in Russian).
3. **Cheng R. K.** Surveyor Terminal Guidance, *Peaceful Uses of Automation in Outer Space*, Springer US, 1966, pp. 499—514.

4. **Siharulidze Ju. G.** *Ballistika i navedenie letatel'nykh apparatov* (Ballistics and Guidance of Flight Vehicles), Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2011, 407 p. (in Russian).

5. **Razygraev A. P.** *Osnovy upravleniya poljotom kosmicheskikh apparatov* (Fundamentals of spacecraft flight control), Moscow, Mashinostroyeniye, 1990, pp. 378—386 (in Russian).

6. **Lihachev V. N., Siharulidze Ju. G., Fedotov V. P.** i dr. *Vestnik FGUP NPO n. a. S. A. Lavochkina*, 2012, no. 4, pp. 92—102 (in Russian).

7. **Batenko A. P.** *Sistemy terminal'nogo upravleniya* (Terminal Control Systems), Moscow, Radio i svyaz', 1984, 161 p. (in Russian).

8. **Klumpp A. R.** Apollo Lunar Descent Guidance, *Automatica*, 1974, vol. 10, no. 2, pp. 133—146.

9. **Moesser T. G.** Guidance and Navigation Linear Covariance Analysis for Lunar Powered Descent, 2010, All Graduate Theses and Dissertations, p. 654.

10. **Fomichev A. V., Li E. K.** Analytical 3D Terminal Guidance Algorithm for Lunar Landing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 6, pp. 423—431 (in Russian).

УДК 629.7

DOI: 10.17587/mau.18.492-495

Г. П. Шибанов, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., gprshibanov@mail.ru,
Государственный летно-испытательный центр им. В. П. Чкалова

Оценка степени обученности оператора для управления летательным аппаратом

Предлагается дисперсионный метод объективной оценки степени обученности оператора для управления сложным транспортным средством на примере маневренного летательного аппарата. Внешнее (входное) воздействие на летательный аппарат со стороны окружающей его в полете среды воспроизводится с необходимой спектральной плотностью путем пропускания через формирующий фильтр второго порядка сигнала от промышленного генератора белого шума.

Ключевые слова: оценка, оператор, качество подготовки, надежность, летательный аппарат, эффективность, тренировка, формирующий фильтр второго порядка

Непрерывное поддержание мастерства операторов путем выполнения систематических тренировок по управлению сложными транспортными средствами типа атомных подводных лодок, космических кораблей, наземных большегрузных транспортных средств специального назначения, высокоманевренных летательных аппаратов — это один из основных факторов, определяющих безопасность функционирования такого типа объектов. Повышенная опасность для жизни экипажей этого типа транспортных средств в начальный период эксплуатации и их высокая стоимость привели к необходимости создания тренажеров, воспроизводящих иллюзию пространственного перемещения подобных средств в соответствующей среде и позволяющих отрабатывать действия операторов при управлении ими.

Важный фактор при обучении операторов на тренажерах — умение контролировать и анализировать процессы управления и сравнивать их между собой. В настоящее время на основе практического опыта обучения операторов сложных транспортных средств разработаны методы и нормативы оценки качества управления указанными средствами [1—3].

Однако при оценке степени тренированности операторов и качества управления транспортными средствами различного назначения большое значение занимают субъективные критерии, входящие в ряд нормативов [3]. Основные причины субъективизма в оценке качества управления такими транспортными средствами операторами — индивидуальные психофизиологические особенности последних и разный уровень профессиональной подготовки инструкторов. Вместе с тем, практически невозможно полностью автоматизировать процесс подготовки операторов и оценивание достигнутого ими качества управления транспортными средствами. Человек-инструктор нужен хотя бы на конечном этапе подготовки операторов. Об этом красноречиво говорит опыт подготовки операторов, входящих в состав экипажей летательных аппаратов (летчиков, штурманов, бортинженеров и других специалистов, реализующих специфические функции операторов в полете). Особенно сложной оказывается подготовка летчиков-истребителей, выступающих в роли операторов высокоманевренных сверх- и гиперзвуковых летательных аппаратов, из-за острого дефицита времени, необходимого им для принятия решений и последующей реализации

управляющих воздействий на органы управления. Остановимся на этом более подробно.

Сложность воспроизведения на тренажере стрессовых условий полета определяется не только тем, что на летательный аппарат в полете действуют возмущающие силы, которые могут быть представлены как стационарный случайный процесс определенного диапазона частот и амплитуд, но и необходимостью учета психофизиологических возможностей человека-оператора [1, 2].

Если случайные стационарные возмущения оценивать средним квадратическим отклонением σ_x [4–6] и, кроме того, проводить измерение средней квадратической ошибки пилотирования (прицеливания, управления бортовыми системами) σ , то предлагаемый дисперсионный метод объективной оценки процесса тренировки и степени обученности операторов летательного аппарата в задачах стабилизации и управления последним сводится к определению отношения σ/σ_x .

Сущность данного метода состоит в том, что если, несмотря на продолжение тренировок, численное значение отношения σ/σ_x не уменьшается (является минимальным $[\sigma/\sigma_x]_{\min}$), то это указывает на тот факт, что оператор достаточно обучен управлению объектом, и ошибка пилотирования остается в среднем неизменной.

Значения $[\sigma/\sigma_x]_{\min}$ у операторов различны и зависят от индивидуальных качеств человека, определяемых его психофизиологическими возможностями. Чем меньше значение $[\sigma/\sigma_x]_{\min}$, тем лучше оператор может стабилизировать летательный аппарат и управлять им.

При обосновании дисперсионного метода объективной оценки процессов тренировок и степени обученности будем исходить из того, что для обучения операторов навыкам управления летательным аппаратом на тренажерах используются следующие основные четыре задачи стабилизации и управления [7–10].

1. Стабилизация изолированного движения крена. Данное движение описывается уравнением

$$\ddot{\gamma} + k_{\dot{\gamma}} \dot{\gamma} = k^i Z_p + \chi_{\gamma},$$

где γ , $\dot{\gamma}$, $\ddot{\gamma}$ — угол крена, первая и вторая его производные; $k_{\dot{\gamma}}$, k^i — коэффициенты передачи; Z_p — перемещение ручки управления в поперечном направлении; χ_{γ} — непрерывное случайное возмущение в поперечном направлении.

2. Стабилизация изолированного движения тангажа. Движение объекта управления в данном случае описывается системой уравнений

$$\ddot{\alpha} + 2\xi\omega_0\dot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = K^{\alpha}X_p + \chi_{\alpha} = S_{\alpha}\alpha + \dot{\alpha},$$

где α , $\dot{\alpha}$, $\ddot{\alpha}$ — угол атаки, первая и вторая его производные; ξ — коэффициент демпфирования летательного аппарата; ω_0 — собственная частота лета-

тельного аппарата; K^{α} , S_{α} — коэффициенты передачи; X_p — перемещение ручки управления в продольном направлении; χ_{α} — непрерывное случайное возмущение в продольном направлении.

3. Стабилизация движения крена при наличии тангажа. Движение по крену и тангажу описывается так же, как в предыдущих задачах, однако при этом внешние возмущения в канале тангажа отсутствуют ($\chi_{\alpha} = 0$).

4. Управление летательным аппаратом. Движение летательного аппарата описывается в этом случае уравнениями

$$\ddot{\theta} + 2\xi\omega_0\dot{\theta} + \omega_0^2\theta = K^{\alpha}\alpha + \chi_{\alpha};$$

$$\ddot{\theta} = S_{\alpha}\alpha; \dot{H} = \frac{V}{57,3}\theta,$$

где θ , $\ddot{\theta}$ — угол наклона траектории и его вторая производная; V — скорость полета; $\dot{H}$ — превышение летательного аппарата над заданной точкой.

Передаточная функция оператора при решении задач стабилизации по крену достаточно точно описывается выражением вида [2]

$$W = (\mu_{\dot{\gamma}}p + \mu_{\gamma})e^{-\tau p}, \quad (1)$$

где $\mu_{\dot{\gamma}}$, μ_{γ} — коэффициенты передачи, изменяющиеся по мере роста натренированности оператора; p — оператор Лапласа; τ — время реакции оператора. Опыт работы операторов показывает, что тренировки почти не изменяют полное время реакции, поэтому его можно считать постоянным, равным 0,2 с [2, 11, 12].

Передаточная функция оператора имеет аналогичный вид и при решении задач стабилизации по тангажу, и при управлении летательным аппаратом.

Коэффициенты передачи можно определить из выражений, полученных из условия минимума среднеквадратической ошибки между вычисляемым по передаточной функции оператора (1) и фактическим перемещением ручки управления. Выражения для определения этих коэффициентов в канале крена имеют вид

$$\mu_{\dot{\gamma}} = \frac{\int_0^T Z_p \dot{\gamma}(t-\tau) dt}{\int_0^T \dot{\gamma}^2(t-\tau) dt}; \quad \mu_{\gamma} = \frac{\int_0^T Z_p \gamma(t-\tau) dt}{\int_0^T \gamma^2(t-\tau) dt}.$$

Ошибка аппроксимации действий оператора в канале крена определяется выражением

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [\mu_{\dot{\gamma}} \dot{\gamma}(t-\tau) + \mu_{\gamma} \gamma(t-\tau) - Z_p(t)]^2 dt.$$

Внешнее возмущение X со спектральной плотностью, близкой к той, что характерна для реальных условий полета летательного аппарата, может быть получено путем пропускания сигнала от про-

мышленного генератора белого шума через формирующий фильтр второго порядка вида [5]

$$X = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}.$$

Практическую проверку предлагаемого дисперсионного метода объективной оценки качества тренировки и степени обученности операторов проводили на специализированном тренажере летчиков применительно к задачам стабилизации и прицеливания. Тренажер был выполнен на тех же принципах и элементной базе, что и серийные тренажеры. В проверке метода принимали участие операторы различной квалификации с различным опытом летной работы.

В процессе практической проверки предлагаемого метода установлено, что:

- у всех операторов ошибка пилотирования через 5...7 дней тренировок уменьшается не менее чем в два-три раза, при этом коэффициенты передаточной функции оператора в соответствующих каналах управления увеличиваются более чем в три-четыре раза;
- излишнее число тренировок при решении задач стабилизации и прицеливания практически не снижает среднеквадратической ошибки пилотирования и не увеличивает коэффициентов передаточной функции оператора;
- для восстановления навыков пилотирования после длительного перерыва даже опытному оператору необходима тренировка. Например, при перерыве в пилотировании в один месяц необходима тренировка продолжительностью не менее одного рабочего дня;
- для характеристики процесса обучения наряду с ошибкой пилотирования целесообразно использовать коэффициенты передаточной функции оператора. Это обусловлено тем, что, несмотря на то что среднеквадратическая ошибка пилотирования почти не меняется, коэффициенты передачи по мере дальнейшего обучения продолжают некоторое время увеличиваться.

В заключение следует заметить, что предложенный метод дает возможность:

- объективно оценить степень тренированности и подготовленности операторов к решению задач

управления летательными аппаратами по значениям относительной среднеквадратической ошибки управления и коэффициентам передаточной функции оператора в различных каналах управления;

- сократить сроки обучения операторов и более эффективно использовать тренажеры за счет повышения точности определения степени подготовки операторов и выявления их индивидуальных качеств в задачах управления летательным аппаратом по различным каналам.

Использование в тренажерах в качестве возмущающих сил стационарного случайного процесса определенного диапазона амплитуд и частот приближает условия тренировки операторов на тренажере к реальным условиям полета и повышает качество тренажей.

Список литературы

1. Шибанов Г. П. Оценка эффективности работы экипажа в условиях стресса // Психологические проблемы космических полетов. М.: Наука, 1979. С. 69—84.
2. Шибанов Г. П. Количественная оценка деятельности человека в системах "человек-техника". М.: Машиностроение, 1983. 263 с.
3. Нафтульев А. И. Некоторые инженерно-психологические проблемы разработки тренажеров // Ученые записки ЛГУ. № 380. Экспериментальная и прикладная психология. 1975. Вып. 6. С. 88—94.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука. Физматгиз, 1962. 564 с.
5. Пугачев В. С. Оптимальные обучающие системы // Докл. АН СССР. 1967. Т. 175, № 5. С. 1022—1025.
6. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука. Физматгиз, 1979. 496 с.
7. Шибанов Г. П. Оптимизация системы управления летательного аппарата по критериям управляемости и наблюдаемости // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 4. С. 57—61.
8. Шибанов Г. П. Оптимизация процесса контроля бортовых комплексов оборудования летательных аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 56—61.
9. Бюшгенс Г. С. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов. М.: Наука, 1998. 770 с.
10. Математическое моделирование при формировании облика летательного аппарата / В. В. Гуляев, О. Ф. Демченко, Н. И. Долженков и др.; Под ред. В. А. Подобедова. М.: Машиностроение-Полет, 2005. 496 с.
11. Ушаков И. Б., Богомолов А. В., Кукушкин Ю. А. Паттерны функциональных состояний оператора. М.: Наука, 2010. 390 с.
12. Ушаков И. Б., Кукушкин Ю. А., Богомолов А. В. Физиология труда и надежность деятельности человека / Под ред. А. И. Григорьева. М.: Наука, 2008. 317 с.

Evaluation of the Quality of Training of the Aircraft Operators

G. P. Shibanov, gpshibanov@mail.ru✉,

Government Test-flight Center named after V. P. Chkalov, Akhtubinsk, Russian Federation

Corresponding author: Shibanov Georgii P., D. Sc., Professor, Leading Researcher,
Government Test-flight Center named after V. P. Chkalov, Akhtubinsk, Russian Federation,
e-mail: gpshibanov@mail.ru

Received on September 29, 2016

Accepted on October 21, 2016

Safety and efficiency of operation of complex high-cost means of transportation are impossible without thorough training of operators. Major attention in the process of training of the operators is devoted to the trainer-machine and methods of evaluation of the reached results of training. The author proposes a methodology for evaluation of the quality of man-operator training for operation of the complex high-cost means of transportation, aircraft, for example. In the process of realization of operators' training the trainer-machines are used for receiving signals from the filter of the second order. The filter meets the standard of a generator of a white noise. Use of a standard generator of the white noise gives a possibility to obtain valuable conclusions. The experiment of the trainer-machine was an immediate success — the results were surprising. A spectrum of the signals were received, which by the frequency and amplitude, as it was found out, were near the spectrum of the signals typical for the real conditions of a high-mobile flight of an aircraft. Evaluation of the reached results of training on the trainer-machine demonstrated the quality of stabilization and direction-control of an aircraft as far as four rather difficult problems are concerned. Those problems relate to the dynamics of an aircraft. They are described by the systems of a differentiation equation, which is the program maintenance of the trainer-machine. An operator solves the problems of the longitudinal and transversal or diametrical direction of a flight. The mathematical algorithm for stabilization and direction of an aircraft envisages that the machine time of the operator's reaction is equal to 2 s. It is the time accepted for the standard, based on the results of a big number of experiments and thorough research. Evaluation of the reached results of training of a man-operator is based on the established facts and it ensures the minimal value of the ratio of the root-mean-square deviations of the parameters of a turbulent airflow and errors of stabilization and control of a man-operator on pitch and roll of a plane (aircraft).

Keywords: estimation, operator, quality of training, reliability, aircraft, effectiveness, training, form-filter of the second order

For citation:

Shibanov G. P. Evaluation of the Quality of Training of the Aircraft Operators, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 492—495.

DOI: 10.17587/mau.18.492-495

References

1. **Shibanov G. P.** Estimation of efficiency work of crew at stress conditions, *Psychological problems of space flight*, Moscow, Nauka, 1979, pp. 69—84 (in Russian).
2. **Shibanov G. P.** Quantitative estimation of man operational in systems "man-machinery", Moscow, Mashinostroenie, 1983, 263 p. (in Russian).
3. **Naftulyev A. I.** Certain engineer-psychology problems of development trainers, *Scientific paper of LGU*, no. 380, *Experimental and applied psychology*, Leningrad, 1975, iss. 6, pp. 88—94 (in Russian).
4. **Ventcel E. S.** Theory of probability, Moscow, Nauka, Fismatgis, 1974, 564 p. (in Russian).
5. **Pugachev V. S.** Optimization training systems, *Paper of AN SSSR*, 1967, vol. 175, no. 5, pp. 1022—1025 (in Russian).
6. **Pugachev V. S.** Theory of probability and mathematical statistics, Moscow, Nauka, Fismatgis, 1979, 496 p. (in Russian).
7. **Shibanov G. P.** Optimization of systems control flying machine for criteria controlled and observable, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 4, pp. 57—59 (in Russian).
8. **Shibanov G. P.** Optimization of process test-control of airborne of flying machine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 6, pp. 57—61 (in Russian).
9. **Bujgens G. S.** Aerodynamics, stability and controllability of supersonic airplanes, Moscow, Nauka, 1998, 770 p. (in Russian).
10. **Gulyev V. V., Demchenko O. F., Doldenkov N. I.** et al; Edited by V. A. Podobedov. Mathematic simulation in the time of formation the face flying machine, Moscow, Mashinostroenie-Polet, 2005, 496 p. (in Russian).
11. **Ushakov I. B., Bogomolov A. V., Kukushkin Ju. A.** Patterns of functional state of operator, Moscow, Nauka, 2010, 390 p. (in Russian).
12. **Ushakov I. B., Kukushkin Ju. A., Bogomolov A. V.** Edited by A. I. Grigoriev, Physiology of work and reliability of man activities, Moscow, Nauka, 2008, 317 p. (in Russian).

УДК 629.7.05.67: 629.7.054.44

DOI: 10.17587/mau.18.495-502

В. М. Солдаткин, д-р техн. наук, зав. кафедрой, w-soldatkin@mail.ru,

В. В. Солдаткин, д-р техн. наук, доц., w-soldatkin@mail.ru,

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ,

Д. Л. Крылов, гл. конструктор, kdldim@mail.ru,

АО "Аэроприбор-Восход", Москва

Теоретические основы построения системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока

Раскрываются особенности построения, алгоритмы обработки информации, методика и оценка погрешностей измерения высотно-скоростных параметров системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока.

Ключевые слова: самолет, воздушные сигналы, измерение, система, неподвижный невыступающий приемник, теоретические основы построения, алгоритмы, оценка точности измерительных каналов

Введение

Полет самолета происходит в пределах атмосферы, и для его выполнения в штурвальный и автоматическом режимах пилотирования и эффективного решения полетных задач необходима достоверная

информация о величине и составляющих вектора истинной воздушной скорости, аэродинамических углах атаки и скольжения, барометрической высоте, приборной скорости, числе Маха, других воздушных сигналах, определяющих аэродинамику и

контур фюзеляжа система приемных электродов и другие достоинства ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости определяют целесообразность построения на его основе системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока.

1. Построение системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока

На рис. 1 приведена функциональная схема системы воздушных сигналов с неподвижным невыступающим приемником потока, построенной на основе ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки [9].

Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости ДАУ ВС содержит приемную плату 1, в центре 0 которой установлен разрядник 2, подключенный к генератору метки ГМ. На окружности радиуса R с центром в точке 0 генерации меток под одинаковыми углами расположены приемные электроды (ПЭ) 3.

Для формирования логотметрических информативных сигналов $U(\alpha)$ по измеряемому углу α система приемных электродов выполнена в виде металлической маски, как показано на рис. 2.

Маска представляет собой тонкую металлическую пластину 1, на которой находятся отверстия 2, рас-

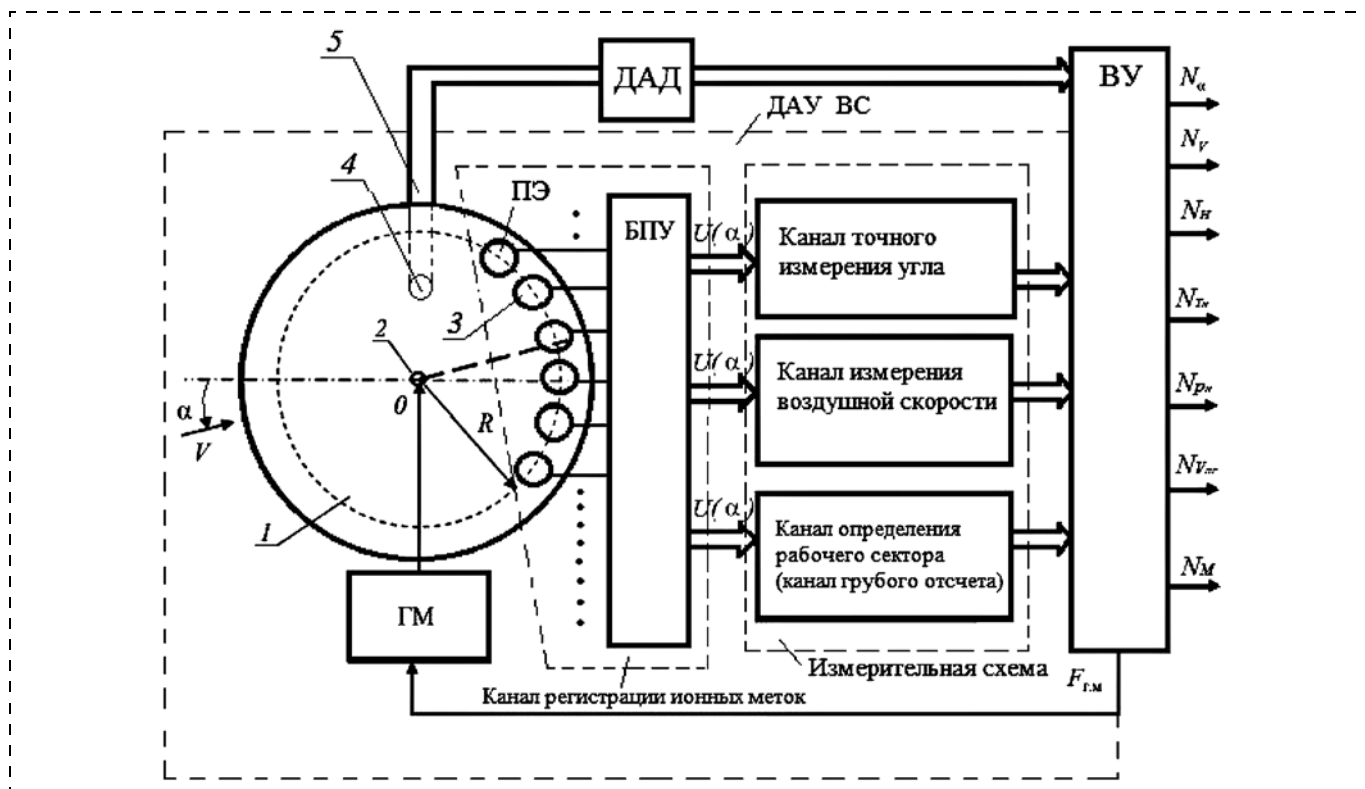


Рис. 1. Функциональная схема системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока

положенные на одинаковом расстоянии по окружности радиусом R с центром в точке генерации ионной метки. Под маской 1 находится диэлектрическая плата 3 с приемными электродами 4 , которые располагаются непосредственно под отверстиями 2 металлической маски 1 .

Данная конструкция системы приемных электродов является достаточно простой в реализации и позволяет обеспечить высокую точность формирования синусоидальных и косинусоидальных угловых характеристик информативных сигналов $U(\alpha)$ блока предварительных усилителей канала регистрации ионных меток (рис. 2, б). Выходные логометрические сигналы $U(\alpha)$ БПУ подаются на входы измерительной схемы.

Измерительная схема датчика включает три канала: канал определения рабочего сектора изме-

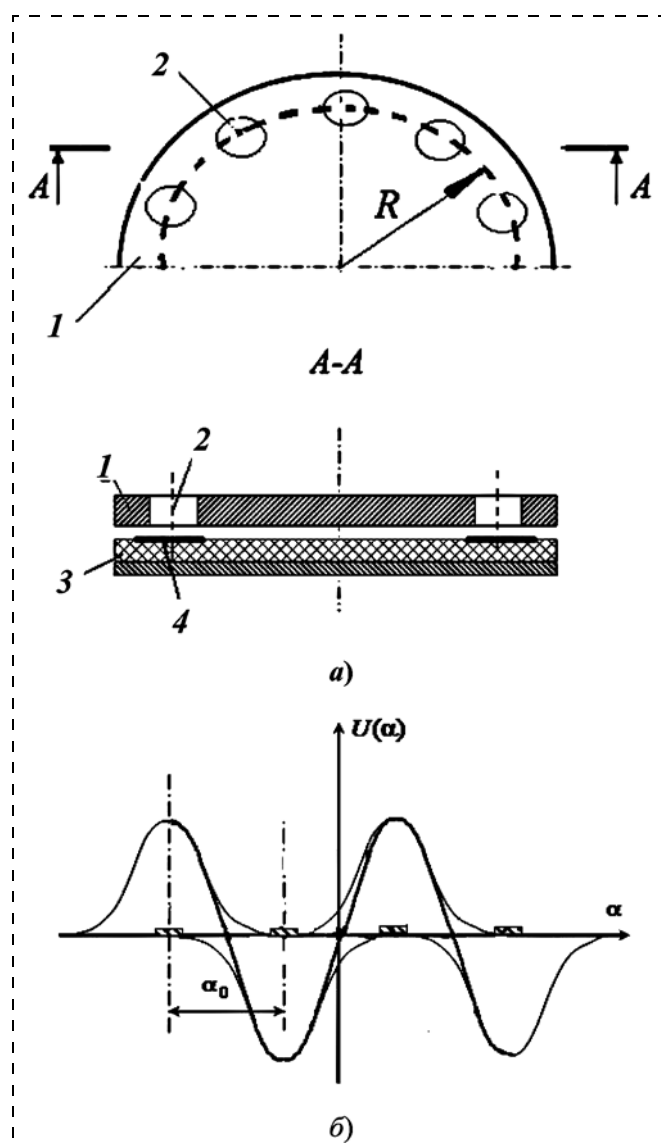


Рис. 2. Конструкция металлической маски (а) и принцип формирования логометрических характеристик (б) системой приемных электродов

ряемого аэродинамического угла α (канал грубого отсчета), канал точного измерения измеряемого угла в пределах рабочего сектора и канал измерения истинной воздушной скорости V_B , выходы которых подключены к вычислительному устройству (ВУ). На выходе ВУ формируются цифровые сигналы N_α и N_V по аэродинамическому углу α и модулю V_B вектора истинной воздушной скорости. ВУ выдает также сигнал $F_{ГМ}$, управляющий работой генератора меток ГМ, который задает частоту $F_{ГМ}$ формирования ионной метки.

Выполнение измерительной схемы в виде канала определения рабочего сектора измеряемого угла, являющегося каналом грубого отсчета, и канала точного измерения угла в каждом из рабочих секторов позволяет существенно повысить разрешающую способность по измеряемому аэродинамическому углу во всем диапазоне его изменения без увеличения числа приемных электродов и габаритных размеров системы приемных электродов. Двухканальное выполнение канала измерения аэродинамического угла обеспечивает надежное определение рабочего сектора и точное измерение текущего значения угла внутри каждого рабочего сектора. Это позволяет повысить точность измерения в широком диапазоне изменения аэродинамического угла при одновременном изменении модуля истинной воздушной скорости. Канал измерения истинной воздушной скорости позволяет с высокой точностью формировать интервал времени пролета ионной метки от точки генерации до окружности с приемными электродами при одновременном изменении аэродинамического угла, что повышает точность измерения истинной воздушной скорости.

Для обеспечения одновременного измерения всех воздушных сигналов самолета с использованием рассмотренного ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости предложено [9] на металлической пластине — маске системы приемных электродов расположить отверстие-приемник 4 (см. рис. 1) для забора статического давления P_H набегающего воздушного потока, связанное пневмоканалом 5 со входом датчика абсолютного давления ДАД, например цифрового, выход которого подключен ко входу вычислительного устройства ВУ, обеспечивающего вычисление воздушных сигналов самолета.

Алгоритмы обработки информации системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока

Ионно-меточный датчик аэродинамических углов и истинной воздушной скорости с встроенным приемником статического давления устанавливается на самолете таким образом, чтобы система приемных электродов 1 (см. рис. 1) находилась в плоскости изменения измеряемого аэродинамического угла α вектора $V_B = -V$ истинной воздушной скорости. Цикл измерения начинается с подачи

с выхода вычислительного устройства ВУ сигнала $F_{ГМ}$. В соответствии с сигналом $F_{ГМ}$ генератор метки ГМ выдает импульс высоковольтного напряжения на разрядник 2, установленный в точке 0 генерации ионной метки. За счет искрового разряда разрядника в точке 0 образуется ионизированная область — ионная метка с явно выраженным электростатическим зарядом q_M . Заряженная ионная метка перемещается совместно с вектором скорости V набегающего воздушного потока и приобретает его параметры движения — скорость V и направление α относительно оси симметрии системы приемных электродов 1. При перемещении ионной метки совместно с набегающим воздушным потоком заряженная ионная метка пролетает вблизи приемных электродов 3 и наводит (индуцирует) на них электрические заряды, значение которых зависит от расстояния ионной метки от приемного электрода и углового положения α траектории движения ионной метки.

За счет выбора конструктивных параметров системы приемных электродов с помощью четных приемных электродов на выходах четных предварительных усилителей формируются положительные и отрицательные полуволны синусоидальных угловых характеристик информативных сигналов $U(\alpha)$ (рис. 2, б). С помощью нечетных приемных электродов на выходах нечетных предварительных усилителей формируются положительные и отрицательные полуволны косинусоидальных угловых характеристик информативных сигналов $U(\alpha)$.

Выходные сигналы предварительных усилителей блока предварительных усилителей (БПУ) (см. рис. 1) подаются на входы канала определения рабочего сектора (канал грубого отсчета) измеряемого аэродинамического угла, канала точного измерения угла в рабочем секторе и канала измерения истинной воздушной скорости. Выходные сигналы указанных каналов подаются на входы ВУ, который по результатам обработки входной информации выдает цифровые коды N_α , N_V по измеряемому аэродинамическому углу α и воздушной скорости V_B .

При попадании траектории ионной метки в i -й грубый канал текущее значение измеряемого аэродинамического угла определяется как

$$\alpha = i\alpha_0 + \alpha_p, \quad (1)$$

где α_0 — угол, охватывающий рабочий сектор грубого канала отсчета (при $i_{\max} = 4$, $\alpha_0 = 90^\circ$); i — номер рабочего сектора ($i = \overline{1, 4}$).

Сигналы $\sin U(\alpha_i)$ и $\cos U(\alpha_i)$, пропорциональные синусу и косинусу измеряемого угла α_i в рабочем секторе грубого канала, обрабатываются в вычислительном устройстве, на выходе которого выдается цифровой код N_α , связанный со значением α_p из-

меряемого аэродинамического угла точного канала соотношением

$$\alpha_p = \arctg \frac{\sin U(\alpha_i)}{\cos U(\alpha_i)}, \quad (2)$$

где α_i — текущее значение аэродинамического угла в пределах i -го рабочего сектора.

При работе канала измерения истинной воздушной скорости формируется интервал времени τ_V пролета ионной метки расстояния R от точки генерации ионной метки до окружности с приемными электродами. В соответствии с интервалом времени τ_V в вычислительном устройстве вырабатывается цифровой код N_V , пропорциональный истинной воздушной скорости

$$V_B = \frac{R}{\tau_V}. \quad (3)$$

По воспринимаемому статическому давлению P_H в соответствии со стандартными зависимостями, соответствующими ГОСТ 4401—81 [11], определяется текущая абсолютная барометрическая высота полета по формулам

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] \text{ при } -2000 \text{ м} < H \leq 11\,000 \text{ м};$$

$$H = H_{11} + RT_{11} \ln \frac{P_{11}}{P_H} \text{ при } 11\,000 \text{ м} < H \leq 20\,000 \text{ м}, \quad (4)$$

где $T_0 = 288,15^\circ\text{К}$ — средняя абсолютная температура на уровне моря; $P_0 = 101\,325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ — среднее абсолютное давление на уровне моря; $\tau = 0,0065 \text{ К/м}$ — температурный градиент, определяющий изменение абсолютной температуры воздуха T_H при измерении высоты; $R = 29,27125 \text{ м/К}$ — газовая постоянная; T_H , P_H — абсолютные температура и давление на текущей высоте H ; $T_{11} = 216,65 \text{ К}$ и $P_{11} = 22\,632 \text{ Па} = 169,754 \text{ мм рт. ст.}$ — абсолютная температура и давление воздуха на высоте $H_{11} = 11\,000 \text{ м}$.

Используя ГОСТ 5212—74 [12], истинную воздушную скорость V_B самолета, измеренную ионно-меточным датчиком, можно представить в виде

$$V_B = \sqrt{2gRT_H \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(\frac{P_{\text{дин}}}{P_H} + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} =$$

$$= \sqrt{2gRT_H \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(\frac{P_{\Pi}}{P_H} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}, \quad (5)$$

где $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; $k = 1,4$ — показатель адиабаты для воздуха;

$P_{\text{дин}} = \frac{\rho_H V_B^2}{2}$ — скоростной напор (динамическое давление) набегающего воздушного потока; $P_{\text{п}} = P_{\text{н}} + P_{\text{дин}}$ — полное давление набегающего воздушного потока; ρ_H — плотность воздуха на высоте полета H , которую можно представить как [13]

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_0}{P_0 T_H}, \quad (6)$$

где $\rho_0 = 0,125 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ — массовая плотность воздуха на высоте $H = 0$.

Если в выражение (5) подставить значения параметров, измеряемых ионно-меточным датчиком с отверстием-приемником для забора статического давления, то с учетом выражения (6) получим соотношение вида

$$V_B^2 = 2gR\left(\frac{k}{k-1}\right) T_H \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0^2 T_H} V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (7)$$

Полученное соотношение устанавливает неявную, но однозначную связь измеряемой ионно-меточным датчиком истинной воздушной скорости V_B с абсолютной температурой T_H воздуха на высоте полета H , например вида [14]:

$$T_H = \frac{V_B^2}{2gR\left(\frac{k}{k-1}\right) \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0}{2P_0^2 T_H} V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}. \quad (8)$$

Определяя из соотношения (8) абсолютную температуру T_H , по зависимости (6) можно вычислить плотность воздуха ρ_H на высоте H .

Тогда в соответствии с ГОСТ 5212—74 [11] можно определить (вычислить) приборную скорость полета — истинную воздушную скорость, приведенную к нормальным условиям на уровне $H = 0$, по формуле

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{2gRT_0\left(\frac{k}{k-1}\right) \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}. \quad (9)$$

При необходимости можно вычислить число Маха—Маевского, характеризующее отношение истинной воздушной скорости к скорости звука $a_H = \sqrt{kgRT_H}$ на данной высоте H . При дозвуковой скорости полета уравнение для определения числа Маха—Маевского имеет вид

$$M = \frac{V_B}{a_H} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_0 P_H}{2P_0^2 T_H} V_B^2 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}. \quad (10)$$

Следует отметить, что для исключения влияния угла скольжения на работу канала угла атаки на самолете необходимо использовать два ионно-меточных датчика, устанавливаемых на правом и левом сторонах фюзеляжа. При этом показания выходных сигналов по углу атаки обоих датчиков усредняются, снижая случайную составляющую погрешности измерения угла атаки самолета. Аналогично усредняются и выходные сигналы по другим высотно-скоростным параметрам, уменьшая случайную погрешность их измерения. Для измерения угла скольжения система приемных электродов еще одного ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости располагается в азимутальной плоскости рыскания. При этом использование трех неподвижных невыступающих приемников потока решает задачу резервирования измерительных каналов и повышения точности и надежности работы системы воздушных сигналов самолета.

Оценка погрешностей измерительных каналов системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока

При определении погрешностей измерения высотно-скоростных параметров в измерительных каналах системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока необходимо учитывать методические и инструментальные погрешности, статические и динамические составляющие, собственные и вынужденные динамические погрешности.

В процессе разработки системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока и встроенным приемником статического давления с учетом конкретного места установки датчика ДАУ ВС на конкретном самолете проводится уточнение алгоритмов обработки первичной информации, а следовательно, и учет основных составляющих методической погрешности измерительных каналов системы.

Снижение собственных и вынужденных динамических погрешностей измерительных каналов системы обеспечивается за счет соответствующего выбора конструктивных параметров датчика ДАУ ВС и использования фильтров доминирующих аэродинамических и турбулентных помех.

Часть основных и дополнительных статических погрешностей измерительных каналов системы учитывается при оценке инструментальной погрешностей ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, полученных по результатам расчетов и экспериментальных исследований образцов датчика в аэродинамической трубе и в летном эксперименте.

За счет соответствующего выбора элементной базы каналов аналого-цифрового преобразования и обработки информативных сигналов в вычисли-

теле их инструментальные погрешности можно не учитывать.

Поэтому оценку погрешностей измерительных каналов системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока проведем по данным инструментальной точности измерения аэродинамического угла и истинной воздушной скорости ионно-меточного датчика.

Погрешность определения барометрической высоты будет определяться, в основном, инструментальной погрешностью используемого датчика статического давления.

С учетом выражения (4) связь погрешности ΔH измерения абсолютной барометрической высоты H с погрешностью ΔP_H используемого в системе датчика абсолютного статического давления P_H в диапазоне высот до 11 000 м будет иметь вид

$$\Delta H = 2396,53 \frac{1}{P_H^{0,807169}} \Delta P_H. \quad (11)$$

Определим значения основной погрешности ΔH измерения барометрической высоты при использовании в качестве датчика статического давления отечественных датчиков типа ДДГ, ДДЧП, ДДГМ [15].

Как показали расчеты, при допустимой относительной погрешности указанных датчиков до 0,01 % [15] в диапазоне высот до 11 000 м (при изменении статического давления в диапазоне от 101 325 до 19 399,4 Па) погрешность измерения барометрической высоты не будет превышать значения $\Delta H < \pm 5 \dots 10$ м.

Как показывает опыт разработки ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости [4], при скорости полета более 40 км/ч погрешности измерения аэродинамического угла и истинной воздушной скорости не превышают значений $\Delta \alpha = \pm 0,15 \dots 0,2^\circ$, $\Delta V_B = \pm (0,004 \dots 0,005) V_B$.

Оценим погрешность ΔT_H определения температуры наружного воздуха T_H в каналах системы воздушных сигналов с учетом погрешности ΔV_B измерения истинной воздушной скорости ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

Подставляя в выражение (15) численные значения входящих величин, получим

$$T_H = \frac{V_B^2}{2008 \left[\left(1 + \frac{1,78 \cdot 10^{-5}}{T_H} V_B^2 \right)^{0,286} \right] - 1}. \quad (12)$$

Так как соотношение (12) неявно отражает связь температуры наружного воздуха T_H с истинной воздушной скоростью V_B , измеряемой ионно-меточным датчиком аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, погрешность ΔT_H

определения температуры наружного воздуха оценим, используя известное соотношение [15]

$$T_H = T_0 - \tau H. \quad (13)$$

В этом случае инструментальная погрешность ΔT_H определения температуры наружного воздуха однозначно связана с погрешностью ΔH определения барометрической высоты, которая определяется инструментальной погрешностью используемого датчика абсолютного давления.

При использовании отечественных датчиков абсолютного давления инструментальную погрешность определения температуры наружного воздуха можно оценить как

$$\Delta T_H \leq \pm \tau \Delta H \leq \pm (0,0325 \dots 0,065) K.$$

Методическая погрешность определения температуры наружного воздуха будет определяться методической погрешностью приемника статического давления, встроенного в поверхность ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

Пренебрегая погрешностью вычисления приборной скорости в каналах системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока, для оценки погрешности определения приборной скорости воспользуемся известной связью ее с истинной воздушной скоростями вида

$$V_{пр} = \Delta_H V_B, \quad (14)$$

где $\Delta_H = \frac{\rho_H}{\rho_0} = \frac{P_H T_0}{P_0 T_H}$ — относительная плотность воздуха на данной высоте H .

Тогда в первом приближении погрешность определения приборной скорости можно оценить соотношением

$$\Delta V_{пр} = \Delta_H V_B = \frac{P_H T_0}{P_0 T_H} \Delta V_B. \quad (15)$$

Подставляя в выражение (15) численные значения, при $H = 0$ получим

$$\Delta V_{пр} = \frac{288,15}{101\,325} \frac{P_H}{T_H} \Delta V_B = 0,284 \cdot 10^{-2} \frac{P_H}{T_H} \Delta V_B. \quad (16)$$

При погрешности измерения истинной воздушной скорости ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости $\Delta V_B = \pm (0,004 \dots 0,005) V_B$ при полете со скоростью $V_B = 300$ м/с на высоте $H = 11\,000$ м получим

$$\begin{aligned} \Delta V_{пр} &= \pm 0,284 \cdot 10^{-2} \frac{22\,632}{216,65} (0,004 \dots 0,005) \cdot 300 = \\ &= \pm (0,29 \dots 0,36) \text{ м/с} = \pm (1,04 \dots 1,32) \text{ км/ч}. \end{aligned}$$

Для оценки погрешности определения числа Маха в каналах системы воспользуемся известным соотношением [15]

$$M = \frac{V_B}{\sqrt{2gRT_H}}. \quad (17)$$

Тогда погрешность ΔM измерения числа Маха можно оценить как

$$\begin{aligned} \Delta M &= \frac{\partial M}{\partial V_B} \Delta V_B + \frac{\partial M}{\partial T_H} \Delta T_H = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2gRT_H}} \Delta V_B + \frac{V_B}{2\sqrt{2gR}} \Delta T_H. \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляя в выражение (18) численные значения входящих величин, получим

$$\Delta M = \frac{0,04}{\sqrt{T_H}} \Delta V_B + \frac{0,02 V_B}{T_H} \Delta T_H.$$

При расчетных значениях $V_B = 300$ м/с; $\Delta V_B = \pm(0,004...0,005)V_B$; $\Delta T_H \leq \pm(0,0325...0,065)$ К получим:

- при $H \approx 0$: $\Delta M \leq \pm 0,005$;
- при $H = 11\,000$ м : $\Delta M \leq \pm 0,0018$.

Таким образом, по сравнению с известными системами система воздушных сигналов, построенная на основе ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с встроенным приемником статического давления, имеет ряд существенных преимуществ.

1. Обеспечивает одновременное измерение всех высотно-скоростных параметров, определяющих движение самолета относительно окружающей воздушной среды в общей точке поверхности самолета.

2. Измерение всех высотно-скоростных параметров движения самолета относительно окружающей воздушной среды осуществляется с помощью одного неподвижного невыступающего приемника потока, не искажающего аэродинамику самолета.

3. Измерение всех высотно-скоростных параметров обеспечивается без существенного усложнения конструктивной схемы ионно-меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

4. Получение выходных сигналов по всем высотно-скоростным параметрам самолета в цифровой форме упрощает их использование в современных системах отображения информации, системах управления и других технических системах самолета.

Разработанная методика позволяет оценить инструментальные погрешности измерительных ка-

налов системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока и встроенным приемником статического давления и при других исходных данных, при этом полученные значения погрешностей измерительных каналов свидетельствуют о их соответствии современным требованиям, определяют перспективы применения системы на самолетах различного класса и назначения.

Список литературы

1. **Практическая** аэродинамика маневренных самолетов / Под ред. Н. М. Лысенко. М.: Воениздат, 1977. 439 с.
2. **Гайнутдинов В. Г.** Алгоритм автоматизированного проектировочного расчета параметров устойчивости и управляемости самолета // Известия вузов. Авиационная техника. 2010. № 3. С. 24–27.
3. **Макаров Н. Н.** Состояние и перспективы развития автономных измерителей пилотажных параметров // Известия вузов. Авиационная техника. 2001. № 2. С. 3–5.
4. **Солдаткин В. М.** Методы и средства измерения аэродинамических углов летательного аппарата. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.
5. **Алексеев Н. В., Вожаев Е. С., Кравцов В. Г.** и др. Системы измерения воздушных сигналов нового поколения // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 8. С. 31–36.
6. **Макаров Н. Н.** Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: теория, проектирование, применение / Под ред. доктора техн. наук В. М. Солдаткина. М.: Машиностроение, 2009. 760 с.
7. **Чумаров А. Р.** Структуры и характеристики ионно-меточных датчиков аэродинамических углов и воздушной скорости // Известия вузов. Авиационная техника. 2001. № 3. С. 34–37.
8. **Ганеев Ф. А.** Синтез структуры и алгоритм преобразования времяпролетного ионно-меточного датчика воздушной скорости и угла атаки самолета // Известия вузов. Авиационная техника. 2006. № 4. С. 53–56.
9. **Патент** на изобретение № 2445634 С2, МПК G01P 5/14. Меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости / Ганеев Ф. А., Солдаткин В. М., Уразбахтин И. Р., Макаров Н. Н., Кожевников В. И. Заявл. 05.05.2010, № 2010118253/28. Опубл. 20.03.2012. Бюл. № 8.
10. **Ганеев Ф. А., Солдаткин В. М.** Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки // Известия вузов. Авиационная техника. 2010. № 3. С. 46–50.
11. **ГОСТ 4401–81.** Атмосфера стандартная. Параметры. М.: Изд-во Стандартов, 1981. 179 с.
12. **ГОСТ 5212–74.** Таблицы аэродинамическая. Динамические давления и температуры торможения воздуха для скорости полета от 10 до 4000 км/ч. Параметры. М.: Изд-во Стандартов, 1974. 239 с.
13. **Залманзон Л. А.** Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 249 с.
14. **Солдаткина Е. С., Солдаткин В. М.** Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с расширенными функциональными возможностями // Известия вузов. Авиационная техника. 2012. № 4. С. 56–59.
15. **Системотехническое** проектирование измерительно-вычислительных систем / Под ред. проф. В. М. Солдаткина. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2011. 150 с.

Theoretical Foundations for Construction the Air Data System for the Aircraft with a Stationary Included Receiver of Flow

V. M. Soldatkin, w-soldatkin@mail.ru✉, **V. V. Soldatkin**, w-soldatkin@mail.ru,
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI,
Kazan, 420111, Republic of Tatarstan, Russian Federation,
D. L. Krylov, kldim@mail.ru,
Aeropribor-Voskhod Co., Moscow, 105318, Russian Federation

Corresponding authors: **Soldatkin Vladimir M.**, D. Sc., Head of Chair,
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI,
Kazan, 420111, Russian Federation, e-mail: w-soldatkin@mail.ru

Received on April 10, 2017

Accepted on May 12, 2017

The traditional air data systems are based on the aerodynamic and aerometric method employing the fixed for the incoming air flow vane sensors of aerodynamic angles, receivers of the air pressures and braking temperatures, which worsen the aerodynamics, cause errors, depending on the parameters of the flight and environment, and reduce reliability of the system in real operating conditions. Ideology of construction, the algorithms of information processing of the air data system of the aircraft with the fixed included receiver of flow are based on the fixed ion-label sensor of aerodynamic angle and true airspeed, which realizes the kinematic measurement method with the accuracy of measurement not depending on the state of the environment. For the simultaneous measurements of all the air signals of the aircraft the onboard receiving electrodes of the ion-label sensor set the vent for collection of the static pressure of the incoming air flow. A functional diagram of the air data system with fixed included receiver of the flow and algorithms for calculation of the altitude-speed flight parameters of the aircraft is presented. The methodology and estimation of the errors of the system measuring channels, which meet the modern requirements and determine prospects for application of the system on the aircraft of various classes and purposes, are also presented.

Keywords: aircraft, air data signals, measurement, system, incoming flow, fixed included receiver, theoretical fundamentals for construction, algorithms, estimation of the accuracy of the measuring channels

For citation:

Soldatkin V. M., Soldatkin V. V., Krylov D. L. Theoretical Foundations for Construction the Air Data System for the Aircraft with a Stationary Included Receiver of Flow, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 495—502.

DOI: 10/17587/mau.18.495-502

References

1. **Lysenko N. M.** ed. Practical aerodynamics of maneuvering aircraft, Moscow, Voenizdat, 1977, 439 p. (in Russian).
2. **Gainutdinov V. G.** *Izvestiya Vuzov. Aviatsonnaya Tekhnika*, 2010, no. 3, pp. 24—27 (in Russian).
3. **Makarov N. N.** *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya Tekhnika*, 2001, no. 2, pp. 3—5 (in Russian).
4. **Soldatkin V. M.** *Metody i sredstva izmereniya aerodinamicheskikh uglov letatel'nogo apparata* (Methods and means of measurement of aerodynamic angles of the aircraft), Kazan, Publishing house of Kazan. state tehn. university press, 2001, 448 p. (in Russian).
5. **Alekseev N. V., Vozhdaev E. S., Kravtsov V. G.** et al. *Aerospace Instrumentation*, 2003, no. 8, pp. 31—36 (in Russian).
6. **Makarov N. N.** *Sistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo ergaticheskogo kompleksa: teoriya, proektirovanie, primeneniye* (System ensure the safety operation of the onboard ergatic complex: theory, design, applications), ed. by doctor of tech. science

V. M. Soldatkin, Moscow, Mechanical Engineering. 2009. 760 p. (in Russian).

7. **Chumarov A. R.** *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya Tekhnika*, 2001, no. 3, pp. 34—37 (in Russian).
8. **Ganeev F. A.** *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya Tekhnika*, 2006, no. 4, pp. 53—56 (in Russian).
9. **Ganeev F. A., Soldatkin V. M., Urazbakhtin I. R., Makarov N. N., Kozhevnikov I. V.** RF patent for invention no. 2445634 C2, IPC G01P 5/14. Label sensor for aerodynamic angle and airspeed, Appl. 05.05.2010, no. 2010118253/28. Publ. 20.03.2012. Bull. no. 8.
10. **Ganeev F. A., Soldatkin V. M.** *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya Tekhnika*, 2010, no. 3, pp. 46—50 (in Russian).
11. **GOST 4401—81.** The atmosphere is standard. Settings, Moscow, Publishing house of Standards, 1981, 179 p. (in Russian).
12. **GOST 5212—74.** Table aerodynamic. Dynamic pressures and temperatures of braking of air for flight velocity from 10 to 4000 km/h. Parameters, Moscow, Publishing house of Standards, 1974, 239 p. (in Russian).
13. **Zalmanson L. A.** Flowing elements of pneumatic devices for controlling and management, Moscow, Publishing house of AN SSSR, 1961, 249 p. (in Russian).
14. **Soldatkin E. S., Soldatkin V. M.** *Izvestiya vuzov. Aviatsonnaya Tekhnika*, 2012, no. 4, pp. 56—59 (in Russian).
15. **Soldatkin V. M.** ed. *Sistemotekhnicheskoe proektirovanie izmeritel'no-vychislitel'nykh sistem* (System-engineering designing of measuring-computational systems), Kazan, Publishing house of Kazan. state tehn. university press, 2011, 150 p. (in Russian).



28 ноября 2017 г. в Москве
В ГК "ИЗМАЙЛОВО" состоится

Восьмая Межотраслевая конференция "АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА — 2017"

Конференция посвящена демонстрации современных информационных технологий, новейших разработок для автоматизации предприятий энергетики, машиностроения, металлургии, химической, нефтегазовой, цементной и других отраслей промышленности, информационно-управляющих систем, АСУТП, АСОДУ, ERP, CRM, MES, АСКУЭ, АИИСКУЭ, ПАЗ, РЗА, SCADA, контрольно-измерительной техники, газоанализаторов, расходомеров, датчиков, уровнемеров и спектрометров; модернизации систем автоматизации, учета, мониторинга и контроля технологических процессов; технологии защиты информации в промышленных системах управления. Организатор конференции — консалтинговая компания ООО "ИНТЕХЭКО".



ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ ДОКЛАДОВ

- Актуальные задачи автоматизации в промышленности. Современные информационные технологии для повышения уровня эффективности, экономичности и безопасности предприятий
- Информационно-управляющие системы промышленной автоматизации (АСУТП, АСКУЭ, ERP, CRM, MES-системы, АСОДУ, SCADA и смежные направления)
- Автоматизация электроснабжения промышленных предприятий. Системы энергоменеджмента
- Практический опыт внедрения информационных систем на предприятиях различных отраслей
- Теория и практика управления информационной безопасностью промышленных предприятий
- Проблемы защиты информации в промышленных системах управления
- Современные решения в области контрольно-измерительной техники
- Новейшие типы газоанализаторов, расходомеров, спектрометров, средств мониторинга, контроля и учета, различные типы датчиков
- Системы управления нормативно-справочной информацией
- Автоматизация проектирования, измерений и испытаний

Подробную информацию о конференции см. сайте:
www.intecheco.ru

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *З. В. Наумова*.

Сдано в набор 28.04.2017. Подписано в печать 15.06.2017. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН717 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.



Международная научно-техническая конференция «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА»

2–3 ноября 2017 года

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК,
Тихорецкий пр., 21,
Санкт-Петербург

ПЕРВОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ

Организатор конференции

- ГНЦ РФ ЦНИИ РТК

Оформление участия в конференции

Для участия в конференции необходимо направить регистрационную форму, материалы доклада и экспертное заключение о возможности публикации на e-mail: mrspb@rtc.ru

Финансовые условия

Стоимость участия и условия оплаты на сайте <http://er.rtc.ru/>

Требования к тезисам и докладам

Тезисы доклада (на русском и английском языках) не более 1 страницы, а также материалы доклада, аннотация, ключевые слова на русском языке (не более 5 страниц) и на английском языке (не более 5 страниц) пересылаются на e-mail: mrspb@rtc.ru в виде файла в формате Word for Windows.

Формат страниц – А4, поля: верхнее и нижнее – 1,8 см, левое и правое – 1,9 см. Шрифт текста – Times New Roman Cyr 11 пунктов, позиция табуляции абзаца – 0,8, единичный междустрочный интервал. Таблицы, рисунки, формулы, графики (как объекты) вставляются в текст и обязательно должны содержать название. Графики должны быть выполнены в черно-белом варианте.

Инициалы авторов, фамилия – по центру, шрифт – полужирный курсив, интервал после – 9 пунктов; название – по центру, шрифт – прописной полужирный; интервал после – 9 пунктов; название организации, город, e-mail авторов: шрифт – курсив, интервал после – 9 пунктов; основной текст.

Библиографические ссылки даются арабскими цифрами в квадратных скобках. Список литературы – через 6 пунктов после текста без заголовка и абзаца.

Тематика конференции

- Проектирование робототехнических систем**
Методы, опыт проектирования и применения.
- Робототехника для экстремальных условий функционирования**
Космическая и морская робототехника. Робототехника для чрезвычайных условий катастроф и аварий.
- Военная и антитеррористическая робототехника**
Боевые, боевого обеспечения и антитеррористические робототехнические системы. Разведка, разминирование, охрана, спасательные и транспортные операции.
- Робототехника в медицине и в сфере обслуживания**
Оказание первой помощи. Обслуживание больных и инвалидов, их реабилитация. Микророботы для обследования и лечения внутренних органов.

Основные этапы и даты

Предоставление заявки на участие, тезисов доклада, материалов доклада, экспертного заключения о возможности публикации	до 31 мая 2017
Рассмотрение материалов Программным комитетом и уведомление участников о принятии докладов	до 16 июня 2017
Проведение конференции	2–3 ноября 2017

Официальный язык

Русский; Английский

Председатель программного комитета:

д.т.н., профессор Евгений Иванович Юревич
Тел.: (812) 5524544; e-mail: yurevich@rtc.ru

Секретариат конференции:

Вольяс Татьяна Владимировна
Тел.: (812) 5524162; e-mail: mrspb@rtc.ru



Рисунки к статье С. Э. Чернаковой, Л. А. Станкевича, С. В. Хлопина, А. И. Нечаева
**«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОПЕРАТОРА И РОБОТОВ ПРИ ОБУЧЕНИИ ПОКАЗОМ
 И ТЕЛЕУПРАВЛЕНИИ ГЕТЕРОГЕННЫМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ
 СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФОРМЫ ДВИЖЕНИЯ»**



а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Примеры жестов и «сигнальных поз» капитана команды для управления расстановкой игроков на поле:

а – жест «Я капитан команды»; б – поза капитана «Расстановка 13»;
 в – поза капитана «Расстановка 22»; г – поза капитана «Расстановка 31»

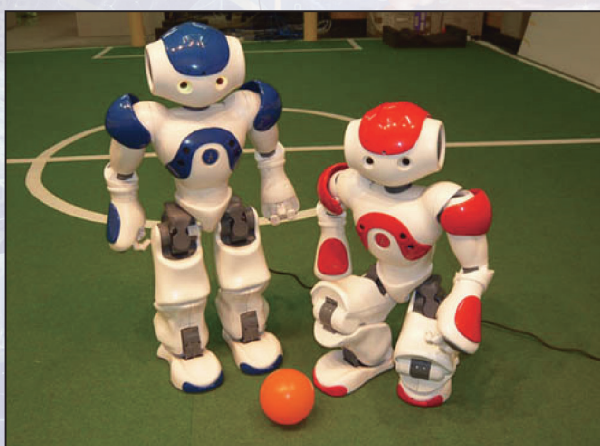


Рис. 7. Телеуправление роботами с использованием маршрутизируемых каналов связи

Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ” выпускает научно-технические журналы



Теоретический и прикладной научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 22765; «Пресса России» – 39795



Ежемесячный теоретический и прикладной
научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 72656; «Пресса России» – 94033



Научно-практический и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79963; «Пресса России» – 94032



Ежемесячный междисциплинарный
теоретический и прикладной научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79493; «Пресса России» – 27849

Все журналы
распространяются
только по подписке.

Оформить подписку можно
через подписные агентства
либо непосредственно
в редакции журналов.

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:
107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ”
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10.

E-mail: antonov@novtex.ru