

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 11 (164)

ноябрь

2014

## Редакционный совет:

VIDYADHAR S., PhD, prof.  
JEN-HWA GUO, PhD, prof.  
JERRY L., PhD, prof.  
KATALINIC B., PhD, prof.  
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.  
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.  
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.  
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.  
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. 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.  
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.  
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.  
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. 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.  
ШЕРБАТЮК 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.  
ЮШЕНКО 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.  
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., 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

### К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА Е. П. ПОПОВА

- Зенкевич С. Л., Назарова А. В., Ющенко А. С.** Е. П. Попов — основатель научной школы робототехники в МГТУ им. Н. Э. Баумана . . . . . 3
- Ардашов А. А., Арсеньев В. Н., Горичев Ю. В., Силантьев С. Б.** Е. П. Попов в Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского . . . . . 7
- Володин Ю. С., Михайлов Б. Б., Ющенко А. С.** Поведение автономного мобильного робота в трехмерном мире . . . . . 11
- Минин А. А., Назарова А. В., Рыжова Т. П.** Распределение задач в децентрализованной робототехнической системе . . . . . 16
- Зенкевич С. Л., Болотин Е. И.** О планировании в мультиагентных системах, использующих методы искусственного интеллекта . . . . . 21
- Михайлов Б. Б., Нгуен А. В.** Использование характеристических точек для распознавания 3D-объектов . . . . . 27

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З.** Оптимизация вычислений при применении генетических алгоритмов в задаче структурно-параметрической идентификации регрессионных моделей . . . . . 33
- Бобырь М. В., Титов В. С., Милостная Н. А.** Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний. Часть 2 . . . . . 38

### РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Шоланов К. С.** Синтез кинематической схемы и решение задачи позиционирования нового параллельного манипулятора . . . . . 44
- Погосов Д. Б.** Позиционно-траекторное управление с учетом требований к мощности на примере гусеничных роботов . . . . . 51

### ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Савонин С. А., Абрамов А. Ю., Рябухо В. П.** Цифровая голографическая микроинтерферометрия процессов взаимодействия в прозрачных средах . . . . . 59

### Журнал в журнале "УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Парамонов П. П., Великанов А. В., Жаринов И. О., Изергин К. М., Костишин М. О.** Особенности построения подсистемы позиционирования наשלемной системы авионики на основе оптико-инерциального принципа . . . . . 68

*Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования*

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:  
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: [mec@novtex.ru](mailto:mec@novtex.ru)

# MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



## МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

### Editorial Council:

ALIEV T. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 ANSHAKOV G. P., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 BIDYADHAR S., PhD, prof.  
 BOLOTNIK N. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 VASILYEV S.N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 JEN-HWA GUO, PhD, prof.  
 JERRY L., PhD, prof.  
 KALYAEV I. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 KATALINIC B., PhD, prof.  
 KRASNEVSKIY L. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 KUZNETSOV N. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 LEONOV G. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 MATVEENKO A. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 MIKRIN E. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 PESHEKHONOV V. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 REZCHIKOV A. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 SEBRYAKOV G. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 SIGOV A. S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 SOJFER V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 SOLOVJEV V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 SOLOMENTSEV Yu. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 FEDOROV I. B., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 CHENTSOV A. G., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 CHERNOUSKO F. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 SCHERBATYUK A. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 YUSUPOV R. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.

### Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Dr. Sci. (Tech.), prof.

### Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 PUTOV V. V., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 YUSCHENKO A. S., Dr. Sci. (Tech.), prof.

### Responsible Secretary:

BEZMEANOVA M. Yu.

### Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 ANTONOV B. I.  
 ARSHANSKY M. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 BUKOV V. N., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 VITTIKH V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 GRADETSKY V. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 IVCHENKO V. D., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 ILYASOV B. G., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 KOLOSOV O. S., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 KOROSTELEV V. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 LEBEDEV G. N., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 LOKHIN V. M., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 PAVLOVSKY V. E., Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof.  
 PROKHOROV N. L., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 PSHIKHOPOV V. Kh., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 RAPOPORT E. Ya., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 SERGEEV S. F., Dr. Sci. (Psychol.), prof.  
 FILARETOV V. F., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 FRADKOV A. L., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 FURSOV V. A., Dr. Sci. (Tech.), prof.  
 YUREVICH E. I., Dr. Sci. (Tech.), prof.

### Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V.

## CONTENTS

### TO THE 100 ANNIVERSARY SINCE BIRTH OF E. P. POPOV

- Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Yushchenko A. S.** E. P. Popov as the Founder of the Scientific Robotic Technology's School in Bauman Moscow State Technical University . . . . 3
- Ardashov A. A., Arsen'ev V. N., Gorichev Yu. V., Silant'ev S. B.** E. P. Popov in the Military Space Academy named after A. F. Mozhayskogo . . . . . 7
- Volodin Yu. S., Mikhailov B. B., Yushenko A. S.** Autonomous Mobile Robot Behavior in 3D World . . . . . 11
- Minin A. A., Nazarova A. V., Ryzhova T. P.** The Task Distribution in Decentralize Robotic System . . . . . 16
- Zenkevich S. L., Bolotin E. I.** Planning in Multiagent Systems that Use Artificial Intelligence Methods . . . . . 21
- Mikhaylov B. B., Nguyen A. V.** The Using Characteristic Points for Recognition of 3D Objects . . . . . 27

### INTELLECTUAL TECHNOLOGIES IN PROBLEMS CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

- Akhmetsafin R. D., Akhmetzafina R. Z.** Computing Optimization at Genetic Algorithms Application to Online Identification of Regression Model . . . . . 33
- Bobyry M. V., Titov V. S., Milostnaya N. A.** Prediction of Mechatronic Systems Based on Soft Fuzzy Knowledge Bases. Part 2. . . . . 38

### ROBOTIC SYSTEMS

- Sholanov K. S.** Synthesis of the Kinematical Scheme and Solution of the Positioning Problem for a New Parallel Manipulator. . . . . 44
- Pogosov D. B.** Position-Trajectory Control with Power Regulation by Example of Tracked Robots . . . . . 51

### MEASUREMENT AND CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

- Savonin S. A., Abramov A. Yu., Ryabukho V. P.** Digital Holographic Interferometry of Mutual Diffusion Processes in the Transparent Medium. . . . . 59

### Journal within journal

#### "CONTROL AND INFORMATICS IN THE AEROSPACE AND MARINE SYSTEMS"

- Paramonov P. P., Velikanov A. V., Zharinov I. O., Izergin K. M., Kostishin M. O.** Features of Construction Helmet Subsystem Positioning System Based on Avionics Optical Inertial Principle . . . . . 68

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

# К 100-летию СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА Е. П. ПОПОВА

С. Л. Зенкевич, д-р физ.-мат. наук, проф., А. В. Назарова, канд. техн. наук, доц.,  
А. С. Ющенко, д-р техн. наук, проф., robot@bmstu.ru, МГТУ им. Н. Э. Баумана

## Е. П. Попов — основатель научной школы робототехники в МГТУ им. Н. Э. Баумана

*Изложена биография Е. П. Попова — выдающегося ученого в области механики, теории автоматического управления и робототехники.*



**ПОПОВ ЕВГЕНИЙ ПАВЛОВИЧ (1914–1999), инженер и математик, выдающийся ученый в области механики, теории автоматического управления и робототехники, академик РАН, генерал-майор, Лауреат государственных премий 1949, 1972 и 1984 гг.**

Евгений Павлович Попов родился 14 февраля 1914 г. в Москве. Отец — Павел Иванович Попов — работал преподавателем физики и астрономии в Нобилковском реальном училище. Мать — Евфалия Андреевна Попова — училась на Высших женских курсах с биологическим уклоном.

Е. П. Попов поступил в школу-десятилетку, но когда перешел в восьмой класс, школы стали семилетками, а затем ученики переходили на профессиональное обучение. Учащимся объявили, что они теперь учатся на первом курсе техникума точной индустрии. Обучаясь в техникуме, Е. П. Попов одновременно работал на заводе "Гизприбор".

В 1934 г. Евгений Павлович стал студентом МВТУ им. Н. Э. Баумана, который вплоть до 1943 г. назывался Московским механико-машиностроительным институтом. Научную работу Е. П. Попов начал на втором курсе Училища по направлению "сопротивление материалов". По результатам выполнения ряда курсовых проектов он опубликовал две статьи в журнале АН СССР "Прикладная математика и механика". Одна из решенных задач была связана с деформацией нецилиндрических пружин, а дру-

гая — с исследованием изгиба тонких стержней при действии нагрузки. Исследуя деформацию пружин, он обнаружил, что жесткость пружины при ее сжатии увеличивается, и зависимость перемещения от сжимающей силы становится нелинейной, причем это характерно для пружин любой формы. Впоследствии это оказалось важным для практики создания антирезонансных пружин.

Вторая задача состояла в нахождении больших перемещений изгиба тонких стержней и пластинок, когда общая деформация изгиба получается очень значительной, так что концы стержня получают перемещения, сравнимые с длиной самого стержня. Получаются самые разнообразные очертания изогнутой оси стержня, вплоть до кругообразных и волнообразных. Решение задачи об изгибе оказывается существенно нелинейным и сводится к эллиптическим интегралам, не берущимся в конечном виде. Такая задача впервые была поставлена Л. Эйлером, который предложил и соответствующий математический метод в общем виде. Позже этой задачей занимался, применительно к частным случаям, целый ряд выдающихся ученых, в том числе и тогдашний заведующий кафедрой сопромата МВТУ проф. Е. Н. Тихомиров. Е. П. Попов разработал универсальный метод расчета, включающий все частные случаи.

Существенное развитие материала первой из этих студенческих работ вылилось в кандидатскую диссертацию, а второй — в докторскую. Потом, через несколько лет, после получения ряда новых разработок в данной области эти работы были удостоены Государственной премии СССР.

После второго курса требовалось определиться со специальностью. Е. П. Попов выбрал специальность "Насосы и гидротурбины", которую вел профессор И. И. Куколевский. Дипломный проект был посвящен проектированию гидротурбины.

После окончания Училища в 1939 г. Е. П. Попова собирались оставить в аспирантуре, но в это время началась массовая мобилизация, и он был призван в армию, где проходил службу в инженерно-технических частях ВВС. Вскоре началась Финская война, а вслед за ней и Великая Отечественная. Сержанту Е. П. Попову пришлось разделить со своими сослуживцами все тяготы службы по время военных

действий. Однако даже в этих условиях он находил возможность писать серьезные научные статьи, которые продолжали печатать академические журналы. В 1942 г. его часть была перебазирована в Йошкар-Олу. Туда же была эвакуирована и созданная в 1941 г. Ленинградская военно-воздушная инженерная академия (ЛВВИА), испытывавшая острую потребность в квалифицированных преподавательских кадрах. В звании старшего сержанта Е. П. Попов был переведен на преподавательскую работу в Академию. Первое офицерское звание молодой ученый получил в 1943 г.

Здесь, в условиях военной академии, способности Е. П. Попова получили чрезвычайно быстрое и мощное развитие. На базе задач, решенных еще в студенческую пору, в 1944 г. в МВТУ им была защищена кандидатская диссертация: "Теория деформации витых пружин с учетом явления посадки витков". Материалы диссертации в переработанном виде были опубликованы в 1950 г. в сборнике Академии наук СССР "Динамика и прочность пружин".

После защиты кандидатской диссертации на базе второго, более сложного цикла своих работ, Е. П. Попов, несмотря на большую педагогическую нагрузку, стал готовить докторскую диссертацию. Это была теоретическая работа: решалась трудная классическая задача, поставленная еще Л. Эйлером. Однако теперь требовалось не только найти математически красивое решение, но и создать инженерные методы исследования и расчета гибких конструкций. Работа была завершена уже в Ленинграде, куда ЛВВИА вернулась к осени 1944 г.

Диссертация называлась "Расчет гибких деталей приборов и машин (прикладная теория плоского изгиба прямого и кривого бруса малой жесткости)". Научные работы, имевшиеся тогда в этой области, заканчивались принципиальными математическими решениями, не дающими инженеру возможности применять их в своих расчетах. Е. П. Попову удалось найти универсальные уравнения и соотношения, позволяющие решать единым методом практически любую частную задачу в этой области. Точное решение задачи изгиба дано в эллиптических интегралах, а поскольку эти интегралы не берутся в аналитической форме, то для удобства инженерных расчетов были составлены специальные числовые таблицы и номограммы. В 1946 г. в возрасте 32 лет Е. П. Попов успешно защитил докторскую диссертацию в МВТУ, которую утвердил ВАК в 1947 г. Автору было присвоено воинское звание инженер-майора.

Основные научные итоги выполненной работы были опубликованы в 1947 г. в издательстве ЛКВВИА в виде книги "Теория и расчет гибких упругих деталей", за которую автор был в 1949 г. удостоен Сталинской премии. В 1948 г. в академии был издан с участием Е. П. Попова "Курс теоретической механики" (Н. В. Бутенин, С. И. Лазеев, Е. П. Попов). В том же году Е. П. Попову было присвоено ученое звание профессора по кафедре теоретической механики, а в 1949 г. — воинское звание инженер-подполковника.

Таким образом, за шесть лет, не выдерживая уставных сроков, Е. П. Попов прошел через все про-

межуточные офицерские звания от старшего сержанта до подполковника.

По результатам, полученным в докторской диссертации, Е. П. Попов издал в 1948 г. в Физматгизе в серии "Современные проблемы механики" монографию "Нелинейные задачи статики тонких стержней". Титульным редактором этой серии был выдающийся ученый-механик профессор (впоследствии член-корреспондент АН СССР) Анатолий Исаакович Лурье. В 1986 г. Е. П. Попов после некоторой доработки переиздал монографию "Теория и расчет гибких упругих стержней" (издательство "Наука").

Развитие науки часто ставит перед учеными задачи, решение которых требует освоения новых областей исследования. Такими областями в 1950-е годы стали автоматика и телемеханика. В 1949 г. Е. П. Попов получил задание создать в Академии кафедру автоматики и телемеханики, первую среди военных вузов. Проблема состояла в том, что автоматика и телемеханика в то время еще не сложились как наука. Не было учебников, которые можно было бы предложить слушателям. Обработав огромное количество доступной к тому времени литературы, преимущественно журнальных статей, Е. П. Попов выстраивает, по существу, новую науку — теорию автоматического управления. Первые книги, написанные им по этому предмету, были изданы в качестве учебного пособия в Ленинградской военно-воздушной академии: "Теория автоматического регулирования" (часть 1 в 1952 г. и часть 2 — в 1953 г.). Следующая книга — "Динамика систем автоматического регулирования" — была издана Гостехиздатом в 1954 г. Ее существенно дополненный и переработанный вариант "Автоматическое регулирование и управление" выдержал пять изданий в издательстве "Физматгиз" с 1956 по 1966 годы. В этот период книга была переведена на иностранные языки и издана в Германии, Англии и США. Отметим, что большое число вышедших впоследствии книг по теории автоматического управления и регулирования, в основном, следуют предложенным Е. П. Поповым разделам этой теории и описывают сделанные им определения и основные положения. Таким образом, автора можно считать одним из основоположников этой науки в России и в мире.

Особый интерес Е. П. Попова вызывала теория нелинейных систем автоматического управления. Возможно, это было связано с его предыдущими работами в области механики, поскольку это были существенно нелинейные задачи. В 1960-е годы он публикует несколько работ, заложивших основы метода гармонической линеаризации нелинейностей. Этот метод до сего дня остается одним из наиболее эффективных методов исследования и проектирования автоматических систем с существенными нелинейностями. Основываясь на разложении сигналов на выходе нелинейного элемента в ряд Фурье и ограничиваясь первой гармоникой, можно получить достаточно простые уравнения для определения параметров автоколебаний в нелинейных автоматических системах. В 1960 г. была издана книга Е. П. Попова и И. П. Пальтова "При-

ближенные методы исследования нелинейных автоматических систем" (издательство "Физматгиз"), содержащая математическое обоснование метода гармонической линеаризации, анализ симметричных автоколебаний и их устойчивости, оценку качества нелинейных переходных процессов и вычисление высших гармоник автоколебаний. Эта книга также была издана за рубежом — в Германии, США и Польше. В последующие десять лет Е. П. Попов продолжил работу над теорией нелинейных автоматических систем. В 1973 г. исследования в этой области были обобщены им в монографии "Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах" (издательство "Наука"). Помимо развития метода гармонической линеаризации новые результаты были получены автором в области процессов управления при вынужденных вибрациях. Так, в результате испытаний ракетной техники выяснилось, что вибрации корпуса ракеты при нелинейности привода рулей приводят к неустойчивости движения в полете. Е. П. Поповым был развит эффективный метод вибрационной линеаризации, позволяющий выбрать параметры системы таким образом, чтобы обеспечить устойчивость. Эти методы в дальнейшем использовались при проектировании баллистических ракет.

Результаты, полученные Е. П. Поповым в теории нелинейных систем управления, получили дальнейшее развитие. Под редакцией Е. П. Попова и при его участии издательство "Машиностроение" в 1978—1980 гг. выпустило серию из 10 книг по теории нелинейных систем автоматического управления. В 1972 г. Е. П. Попов был удостоен второй государственной премии за работы по теории нелинейных систем управления.

В 1960 г. Е. П. Попов был избран членом-корреспондентом АН СССР по отделению механики и процессов управления. В 1964 г. в звании генерал-майора он был переведен на работу в Москву в Научно-технический комитет Генерального штаба и назначен председателем только что созданной Секции прикладных проблем при Президиуме АН СССР. На этом посту он находился с 1964 по 1971 г. Несмотря на большую организационную работу и постоянные командировки, Е. П. Попов продолжает свою научную деятельность. В 1966 г. выходит новая книга, написанная совместно с В. А. Бесекерским, "Теория систем автоматического регулирования", которая трижды переиздавалась и стала основным учебником для нескольких поколений студентов. За работу в Секции прикладных проблем Е. П. Попов был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

После демобилизации из армии в 1971 г. Е. П. Попов вернулся в МВТУ им. Н. Э. Баумана. Одним из инициаторов этого перехода был тогдашний ректор МВТУ академик Г. А. Николаев, с которым Е. П. Попов регулярно встречался на собраниях Академии наук. Вначале он стал заведующим кафедрой прикладной математики, но уже вскоре был назначен заведующим кафедрой "Автоматические системы". К этому времени на кафедре сложилось новое научное направление — дистанционно

управляемые манипуляционные системы, которым руководили профессора Н. А. Лакота и В. С. Кулешов. Вышедшая в 1971 г. книга этих авторов "Динамика систем управления манипуляторами" была первой монографией, изданной в СССР по теории и методам проектирования манипуляционных систем. В ней уже содержались элементы новой науки — робототехники. Оставалось найти способы автоматического управления манипулятором без участия человека. Перспективы этого направления были быстро оценены новым заведующим кафедрой. Под руководством и при самом активном участии Е. П. Попова сложилась группа преподавателей и научных сотрудников начавших работу в области робототехники. Разрабатывались теоретические основы робототехники, была издана серия книг "Научные основы робототехники". Первые две книги этой серии — "Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы" (Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л.) и "Системы управления манипуляционными роботами" (Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С.) — были изданы в издательстве "Наука" в 1978 г. В дальнейшем в написании книг этой серии приняли участие, пожалуй, все ведущие специалисты, работавшие в области робототехники, в том числе Э. В. Попов, А. А. и А. Е. Кобринские, Ф. М. Кулаков, Г. В. Корнев, Г. С. Черноуцкий, А. М. Формальский и другие.

По инициативе Е. П. Попова в перечне научных специальностей ВАК СССР появилась новая специальность — "Роботы, манипуляторы и робототехнические системы". В 1980-е годы были приняты государственные программы, предусматривающие широкое внедрение робототехники в отечественную промышленность. Потребность промышленности в инженерах — разработчиках новых робототехнических систем существенно возросла. В связи с этим было решено ввести новую специальность "Робототехнические системы и комплексы". В Минвузе СССР был создан научно-методический совет по этой специальности, который возглавил Е. П. Попов. В 1984 г. Е. П. Попов создал в МВТУ им. Н. Э. Баумана новую кафедру — "Робототехнические системы", которая стала головной в системе Минвуза по специальности "Робототехнические системы и комплексы".

Один из принципов, которых придерживался Е. П. Попов в своей педагогической работе, состоял в том, чтобы сочетать собственно учебный процесс с активной научной работой студентов. Важной инициативой в этом направлении стало создание в 1981 г. Научно-учебного центра "Робототехника" Академии наук и Минвуза СССР, руководителем которого становится Е. П. Попов. Это было одно из первых научно-педагогических учреждений в России, в которых получила непосредственную реализацию идея интеграции академической науки с вузовской наукой и с учебным процессом. В 1991 г. Центр был преобразован в Научно-учебный центр робототехники и автоматизации МГТУ им. Н. Э. Баумана и Российской Академии наук. Объединение в одном месте научных и педагогических сил, занятых

решением общих проблем, позволило решать многие актуальные задачи промышленности и народного хозяйства, связанные с робототехникой. Были разработаны принципы построения робототехнической системы для обслуживания термоядерного реактора Токамак, построены мобильные роботы, принимавшие участие в работах, связанных с ликвидацией последствий аварии на Чернобыльской АЭС, проводились исследования в области манипуляторов космического базирования, результаты которых были использованы при создании тренажерных устройств для подготовки космонавтов к управлению космическими манипуляторами в Центре подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина. Проводились исследования и по применению робототехнических систем в горной промышленности. За практические результаты, связанные с внедрением в практику робототехнических систем, в том числе гибких производственных систем в промышленности, Е. П. Попов в 1984 г. был награжден третьей Государственной премией.

В 1990-е годы в робототехнике наметились новые тенденции, связанные с использованием методов искусственного интеллекта при управлении роботами, а также с групповым управлением роботами. Е. П. Попов активно поддержал эти новые направления научного поиска. Сотрудниками Центра при его непосредственном участии были разработаны способы адаптивного управления роботами с использованием системы технического зрения, внедренные в производство. Основные результаты научной работы в области робототехники в МВТУ нашли свое отражение в многотомной серии инженерных монографий "Автоматические манипуляторы и робототехнические системы" под общей редакцией Е. П. Попова, изданной в издательстве "Машиностроение".

Будучи руководителем Научно-учебного центра "Робототехника" МВТУ, Е. П. Попов постоянно заботился о поддержании научных и деловых связей Центра с Академией наук. В АН СССР был создан Научно-координационный Совет по научным исследованиям в области робототехники, который возглавил Е. П. Попов. В академическом Институте машиноведения имени академика А. А. Благоднарова была организована лаборатория робототехники, тесно сотрудничавшая с Центром робототехники МВТУ. Ее руководителем тоже был Евгений Павлович. Другим необходимым условием эффективной работы центра "Робототехника" Е. П. Попов считал укрепление рабочих связей с отраслевыми и промышленными исследовательскими организациями. Постоянные деловые связи были установлены между Центром и Санкт-Петербургским Институтом робототехники и кибернетики (ныне Государственный научный центр).

Е. П. Попов сочетал в себе качества выдающегося ученого и педагога. Написанные им во время работы в МВТУ учебники "Теория линейных систем автоматического управления" и "Теория нелинейных систем автоматического управления" до настоящего времени не имеют себе равных по лаконичности и ясности изложения. Эти книги были первыми в се-

рии учебников по теории автоматического управления под редакцией Е. П. Попова, изданных в издательстве "Наука". Еще одна серия учебных пособий из девяти книг, в которой Е. П. Попов принял участие как соавтор и как редактор (издательство "Машиностроение", М., 1983—1989), была написана преимущественно коллективом кафедры робототехники МИРЭА, руководимой академиком РАН И. М. Макаровым, с которым Евгений Павлович всегда поддерживал отношения дружбы и сотрудничества.

В 1992 г. Е. П. Попов был избран действительным членом Российской академии наук. После 1990 г. Е. П. Попов ушел с должности заведующего кафедрой "Робототехнические системы", передав эту работу одному из своих постоянных сотрудников — профессору, д-ру техн. наук А. С. Ющенко. При этом Евгений Павлович остался научным руководителем Центра робототехники МГТУ им. Н. Э. Баумана.

В 1990-е годы наступили тяжелые времена для науки и для Университета. Не избежал этих процессов и Центр робототехники. Промышленность на время потеряла всякий интерес к робототехнике. Но Евгению Павловичу удалось отстоять Центр, в нем ни на один день не прекращался учебный процесс и научные исследования. На кафедре "Робототехнические системы" удалось сохранить и основной научный потенциал, сложившийся ранее.

При очередном обновлении перечня специальностей подготовки инженеров в России реформаторы вообще "забыли" робототехническую специальность, сочтя ее неактуальной для государства. Именно Е. П. Попов вместе с академиками И. М. Макаровым и Д. Е. Охочимским обратились к правительству и отстояли новое направление подготовки специалистов, которое теперь называется "Мехатроника и робототехника".

Интерес к новому в науке, умение вовремя замечать это новое не покидали Е. П. Попова до конца жизни. Последней крупной монографией, в написании которой он участвовал как автор и как редактор, была многотомная энциклопедия "Машиностроение", вышедшая в одноименном издательстве в 2000 г. Том 1—4 этого издания целиком посвящен теории автоматического управления. В написанном им разделе "Теория нелинейных систем" можно найти совершенно новые фрагменты, касающиеся, к примеру, фазового пространства систем высокого порядка и процессов возникновения хаотических движений со странными аттракторами в динамических системах. Кажется, что автор стоял перед новыми открытиями, и только уход из жизни в 1999 г. остановил непрерывный процесс научного поиска.

Похоронен Евгений Павлович на Кунцевском кладбище.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана портрет Евгения Павловича Попова размещен в галерее основателей научных школ с надписью: "Е. П. Попов, академик РАН — основатель научных школ "Нелинейные системы автоматического управления" и "Теоретические основы робототехники".

**S. L. Zenkevich**, Professor, **A. V. Nazarova**, Associate professor,  
**A. S. Yushchenko**, Professor, robot@bmstu.ru, Bauman Moscow State Technical University

## **E. P. Popov as the Founder of the Scientific Robotic Technology's School in Bauman Moscow State Technical University**

*We celebrate now the 100-year Jubilee of academician E. P. Popov. Most part of his life was connected with the Bauman State Technical University (earlier Moscow High Technical College n.a. Bauman). Have been graduated from the University in 1939 E. P. Popov was called up to the army. At 1941 he began his work as a university professor in the Leningrad Military Air Forces Academy. In 1944 and in 1946 he successfully presented his candidate and doctoral thesis in BMSTU. His scientific work was honored with the Stalin reward in 1949. In 1960 E. P. Popov was elected as a correspondent member of the Academy of Science and as a full member of Academy in 1992. From 1971 till his death in 1999 he worked as a professor of BMSTU. He was the founder of a new chair "Robotic Systems" and the research/education Center "Robototechnika". It was a base of a scientific school in robotics in Russia. He was the author and the editor of numerous books on robotics and control theory published in Russia and abroad. We remember E. P. Popov as a distinguished scientist and a teacher.*

**А. А. Ардашов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **В. Н. Арсеньев**, д-р техн. наук, проф.,  
**Ю. В. Горичев**, канд. техн. наук, доц., **С. Б. Силантьев**, канд. техн. наук, проф., silantiev2008@eandex.ru,  
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

### **Е. П. Попов в Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского**

*Статья посвящена 100-летию юбилею выдающегося человека — лауреата трех Государственных премий СССР, действительного члена Российской академии наук доктора технических наук, профессора, генерал-майора Евгения Павловича Попова. Раскрывается "ленинградский" период его жизни, годы становления его как ученого, педагога, организатора научно-педагогических коллективов, основателя и первого начальника кафедры автономных систем управления Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. Представленные факты его жизненного пути позволяют как молодым, так и зрелым людям определить ориентиры в жизни, движение к которым приносит славу российской науке.*

После окончания МВТУ имени Н. Э. Баумана в 1939 г. Евгений Павлович Попов поступил в аспирантуру, с первого курса которой был призван в армию. Так судьба и обстоятельства жизни привели Е. П. Попова на военную службу, с которой оказалась связана большая часть его жизни, и где он достиг звания генерала.

Службу Е. П. Попов проходил в частях ВВС в составе роты солдат с высшим образованием, где он служил техником по электрооборудованию самолетов. Находясь на действительной военной службе, Евгений Павлович всегда находил время для научной работы, творческие поиски стали образом его жизни.

В 1943 г. в звании старшего сержанта Е. П. Попов был назначен преподавателем кафедры теоретической механики Ленинградской Краснознаменной Военно-воздушной инженерной академии (ЛКВВИА) — ныне Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. Его перевод из авиационной части в академию был вызван обстоятельствами того времени. Неотлаженная система всеобщей воинской мобилизации привела к тому, что в военных вузах ощущалась нехватка преподавательского состава.

Находясь на кафедре теоретической механики, Евгений Павлович представил полученные им результаты решения ряда научных задач, сформули-

рованных еще во время его учебы в МВТУ имени Н. Э. Баумана талантливым педагогом Владимиром Михайловичем Макушиным. Он доложил на научно-техническом семинаре об одной из решенных им задач. На этом семинаре присутствовал начальник кафедры сопромата профессор Г. Г. Ростовцев, который с восхищением сказал: "Да это у Вас почти кандидатская диссертация!". Так Е. П. Попов приступил к написанию кандидатской диссертации по теории деформации витых пружин с учетом явления посадки витков, которую успешно защитил в ноябре 1943 г. Ценность работы состояла в разработке методов решения сложных нелинейных уравнений, необходимых при проектировании пружин. Ее результаты широко использовались как в часовой промышленности, так и в приборостроении, в частности, в одном из авиационных НИИ для создания антирезонансных пружин. Разработанный метод приближенного расчета пружин позволил упростить решение задачи проектирования часовых механизмов и компенсационных механизмов стрелочных пружинных приборов. В этом же 1943 г. ему присваивают первое офицерское звание "техник-лейтенант".

После защиты кандидатской диссертации Е. П. Попов приступил к подготовке докторской диссертации на базе второй задачи, поставленной В. М. Макушиным и впервые сформулированной еще

Л. Эйлером. Творческая активность Е. П. Попова позволяла ему делать научные доклады на конференциях, проводимых в Ленинградском университете ученым-кораблестроителем В. В. Новожиловым, знаменитыми математиками С. В. Смирновым, Г. М. Фихтенгольцем, в Ленинградском политехническом институте известным профессором А. И. Лурье, в институте механики Академии наук СССР. Росла его известность в научном мире, в проектных организациях. Апробированный на многочисленных семинарах и конференциях материал был представлен в виде докторской диссертации, которую Е. П. Попов блестяще защитил в 1946 г. После защиты кандидатской прошло всего три года. Е. П. Попову было только 32 года. Достоинство работы состояло в том, что разнообразные задачи продольного изгиба тонкого стержня или тонкой пластинки решались единообразным путем по разработанному алгоритму. Впервые был разработан метод расчета больших деформаций и открыто новое направление в общей теории упругости.

Многочисленные публикации, выступления на различных семинарах принесли широкую известность Е. П. Попову как в научных кругах, так и среди инженеров, которые оценили простоту и универсальность предлагаемых методов решения разнообразных задач проектирования. Опубликованные работы и издания по материалам докторской диссертации, в числе которых монография "Теория и расчет гибких упругих деталей" и "Нелинейные задачи статики тонких стержней", опубликованные в 1947 г. в издательстве ЛКВВИА и в 1948 г. в издательстве "Физматгиз", были представлены в Комитет по Сталинским премиям. В 1949 г. персональная Сталинская премия была присуждена Е. П. Попову, ставшему к этому времени профессором.

Принятие на вооружение новых образцов авиационной техники, которая отличалась высокой насыщенностью автоматическими системами, потребовало от военных вузов скорректировать учебные планы подготовки военных специалистов. Возникла необходимость введения новых дисциплин, в частности, по автоматическим и телемеханическим системам. Поэтому естественным было решение о назначении молодого доктора технических наук, профессора, лауреата Сталинской премии на должность начальника кафедры автоматики и телемеханики. Так в мае 1949 г. 35-летний старший преподаватель кафедры теоретической механики инженер-майор Е. П. Попов круто меняет общее направление своей научной и преподавательской деятельности, став начальником впервые созданной в военных вузах кафедры автоматики и телемеханики. Со свойственной ему энергией Евгений Павлович взялся за создание новой кафедры, разработку учебных планов и программ. Первый состав кафедры включал четырнадцать человек. Заместителем начальника кафедры стал инженер-капитан В. Т. Кочетков.

Одним из первых в стране профессор Е. П. Попов разработал курс "Теория автоматического регули-

рования" и подготовил по нему фундаментальный учебник, первая часть которого была издана академией в 1952 г., а вторая — 1954 г. В том же 1954 г. в издательстве "Физматгиз" выходит монография Е. П. Попова "Динамика систем автоматического регулирования", переведенная и изданная в Германии, Англии и США и принесящая автору мировую известность. До сих пор эта книга пользуется широкой популярностью у студентов, аспирантов и научных сотрудников, постигающих основы теории автоматического управления.

В 1950-х годах по инициативе Е. П. Попова на созданной им кафедре автоматики и телемеханики были начаты научные исследования в области систем автоматического управления летательных аппаратов. Кафедра занималась исследованиями и преподаванием дисциплин, связанных с особенностями построения и функционирования систем управления как баллистических ракет, так и ракет "воздух—воздух", "воздух—земля", "воздух—море", а также самолетов-снарядов. Коллективы учебных лабораторий в это время создавали лабораторные установки, макеты и наглядные пособия по учебным дисциплинам. Так, для изучения средств аэродромной телемеханики и систем телеуправления авиационных бомб, реактивных снарядов и торпед в 1950 г. был создан уникальный аэродинамический стенд, обеспечивающий возможность моделирования пространственного углового движения летательных аппаратов и испытаний автопилотов, а в 1951 г. был создан стенд-макет военного аэродрома. Основным методом исследования динамических систем летательных аппаратов становится метод частичного моделирования, в соответствии с которым динамика объекта моделируется с помощью аналоговой вычислительной машины и электродинамического стенда, а управляющие воздействия формируются реальной (штатной) аппаратурой. Учебная лаборатория, благодаря тесным творческим связям кафедры с ведущими военными НИИ и организациями промышленности, к концу 1950-х гг. была оснащена рядом беспилотных управляемых объектов с наземным контрольно-измерительным оборудованием, аппаратурой наведения и телеизмерений, что обеспечивало высокий уровень эксплуатационной подготовки выпускников. Так, в отделениях лаборатории были развернуты технические позиции наводимого по лучу снаряда класса "воздух—воздух", а также самолета-снаряда "Комета" класса "воздух—земля (море)".

В формировании тематики научных исследований и творческих связей кафедры большую роль сыграла деятельность Е. П. Попова в научно-техническом комитете ВВС, где он был председателем Секции по беспилотным объектам по совместительству с 1954 г. Масштаб научных исследований значительно расширился с образованием на кафедре в 1955 г. научно-исследовательской лаборатории (НИЛ), которая с 1957 г. стала называться лабораторией автоматизации наведения беспилотных

объектов дальнего действия. Сотрудники кафедры и НИЛ образовали единый творческий коллектив.

Кафедра выполняла НИР по заказам командования ВВС и ведущих промышленных организаций, в том числе в соответствии с постановлениями Комиссии по военно-промышленным вопросам Правительства СССР. Необходимо отметить, что общая численность всего возглавляемого Евгением Павловичем коллектива кафедры, включающего преподавателей, научно-исследовательскую и учебную лаборатории, а также адъюнктуру, в лучшие годы превышала 100 человек, а число соискателей и адъюнктов достигало двадцати человек. Научным руководителем у большей части адъюнктов был Евгений Павлович.

Название кафедры неоднократно менялось. Так, в 1958 г. она называлась кафедрой систем управления и наведения крылатых ракет и реактивных снарядов.

В процессе роста кафедры и развития прикладных исследований внутри кафедры формировались новые научные направления, которые приводили и к появлению новых учебных дисциплин. В 1958 г. на базе кафедры Е. П. Попова были созданы три новых кафедры:

- первая в военных вузах страны кафедра электронных вычислительных машин военного применения;
- кафедра инфракрасной техники;
- кафедра автоматического управления.

Костяк вновь образованных кафедр составляли выходцы из коллектива кафедры Е. П. Попова.

В 1950-е годы инженерам и научным работникам, занимающимся анализом и синтезом систем программного управления, стабилизации, следящих систем все чаще приходилось сталкиваться с необходимостью учета существенных нелинейностей в этих системах. Е. П. Попов разработал эффективный и удобный в практическом применении метод гармонического баланса. Теоретической базой этого метода являются идеи гармонического баланса и эквивалентной линеаризации, предложенные в известных трудах Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова, а также развитые в трудах Б. В. Булгакова.

Предложенный метод был развит в трудах его многочисленных учеников и последователей. Было разработано, в частности, понятие помехоустойчивости нелинейных систем управления в условиях воздействия упругих колебаний корпуса и случайных помех, имеющее большое практическое значение. Под руководством Е. П. Попова были проведены исследования методом гармонической линеаризации контура угловой стабилизации гиперзвукового самолета "Буря" с учетом нелинейности рулевого привода и действия высокочастотных вибраций корпуса в месте установки гиросприборов. Оказалось, что спроектированная на основе линейной теории система являлась неустойчивой, что приводило к возникновению аварийных ситуаций. Результаты исследований представителей школы Евгения Павловича были опубликованы в ряде моногра-

фий, начиная с капитального труда Е. П. Попова и И. П. Пальтова "Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем" (Физматгиз, 1960 г.). Эта монография была издана в Германии, США и Польше. Затем были изданы работы Е. И. Хлыпало, Р. А. Нелепина, В. И. Чернецкого и др. Была подготовлена монография "Теория систем телеуправления и самонаведения ракет", опубликованная в издательстве "Наука" в 1964 г. Ее авторами стали В. Т. Кочетков — заместитель начальника кафедры, В. М. Пономарев — приемник Е. П. Попова на должности начальника кафедры, А. М. Половко — будущий начальник кафедры вычислительной техники.

Все это свидетельствовало о том, что на кафедре сложилось мощная научная школа по прикладным методам исследования нелинейных систем во главе с Е. П. Поповым.

В 1960 г. Е. П. Попов был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР по Отделению механики и процессов управления. Евгений Павлович был и остается единственным преподавателем академии, избранным в Академию наук СССР. В этом же году ему было присвоено воинское звание генерал-майора.

Кафедра превратилась, благодаря Е. П. Попову, в один из признанных в стране центров развития приближенных методов исследования нелинейных систем и теории управления движением беспилотное направление на факультете, который получил название факультета систем управления и вычислительной техники. Объектами изучения и исследований стали баллистические ракеты, космические аппараты (КА) и ракеты-носители (РН). Преподаватели и инженеры в кратчайшие сроки не только освоили новую технику, но и разработали новые лекционные курсы и практически переоснастили учебную лабораторию. Разработку дисциплины "Системы управления космических аппаратов" взял на себя Е. П. Попов. Поскольку каких-либо публикаций в этой области в то время не было, лекционные курсы по новым дисциплинам приходилось создавать непосредственно на предприятиях-разработчиках. Доступ к этим материалам был крайне ограничен, однако авторитет Е. П. Попова и его творческие контакты с главными конструкторами и ведущими специалистами открывали перед сотрудниками кафедры все двери. Сам Е. П. Попов, работая над лекционным курсом, много времени провел в конструкторском бюро С. П. Королева в отделе систем управления, который тогда возглавлял Б. В. Раушенбах. Уже в 1962 г. в издательстве академии было издано учебное пособие Е. П. Попова "Системы управления космических аппаратов". Содружество с отделом Б. В. Раушенбаха укрепилось в процессе работы над техническим описанием космического аппарата фотонаблюдения "Зенит", в которой участвовали как сотрудники отдела, так и сотрудники кафедры. В разработке дисциплины

"Автономные системы управления баллистических ракет" большую помощь оказали творческие связи Е. П. Попова с организацией Н. А. Пилюгина. На этой фирме столкнулись с потерей устойчивости в контуре стабилизации при испытаниях баллистических ракет, из-за чего имели место случаи возникновения аварийных ситуаций. Е. П. Попов сразу обратил внимание на сходство этого явления с тем, что имело место при испытаниях объекта "Буря". Был предложен метод расчета систем стабилизации ракет с учетом нелинейности рулевого привода и наличия вынужденных вибраций и автоколебаний.

В декабре 1964 г. Е. П. Попов получил назначение в Научно-технический комитет Генерального штаба Вооруженных сил СССР. Ему было поручено организовать и возглавить Секцию прикладных проблем при Президиуме АН СССР, которая должна была обеспечить использование достижений академической фундаментальной науки в интересах укрепления обороноспособности страны. Одновременно он стал председателем Секции управления движением Научного Совета по проблемам управления движением и навигацией при Президиуме АН СССР. После отъезда в Москву Евгений Павлович поддерживал постоянную связь с академией, благодаря чему быстро установились хорошие деловые отношения с сотрудниками Секции.

Покинув стены академии, которой он отдал более 20 лет молодой, бурной, деятельной жизни, Евгений Павлович Попов оставил неизгладимый след творчества, настойчивости в достижении цели, вечного поиска нового. Заложенные Е. П. Поповым еще в стенах академии научные направления продолжали развиваться, превращаясь в научные школы.

Свои научные школы создали В. М. Пономарев, А. М. Половко, Р. М. Юсупов, Л. И. Каргу, С. М. Федоров и др.

История научных открытий и свершений показывает, что они в большинстве случаев совершаются учеными в молодые годы. Е. П. Попов не является исключением из общей закономерности проявления таланта молодыми людьми.

Военной службе Е. П. Попов отдал большую часть своей сознательной жизни и принес стране огромную пользу. Его успехи при разработке военной техники получили широкое признание и известность. Работать на пределе возможного он считал

для себя естественным и искренне удивлялся, обнаруживая у других иное отношение к делу. Евгений Павлович всегда исходил из интересов дела и не боялся конфликтовать с теми, кто преследовал другие цели. В характере и поведении Евгения Павловича отсутствовали какие-либо черты, вызывающие у его подчиненных внутреннее неприятие. Создание благоприятных условий для постоянного профессионального роста и творческих успехов способствовали созданию на кафедре спокойной дружеской атмосферы, которая поддерживалась также всякого рода коллективными мероприятиями. Он всегда очень внимательно и благожелательно выслушивал собеседника, независимо от того, был ли этот собеседник молодым инженером или маститым ученым, и схватывал самую суть обсуждаемого. Е. П. Попов был уважаем и любим всеми сотрудниками кафедры. Его авторитет на кафедре во всех сферах ее деятельности был непререкаемым. Однако он не был "строгим" начальником, он никогда не "распекал" подчиненных, хотя даже спокойные замечания его действовали эффективнее всякого "разноса". В обращении с сотрудниками кафедры Евгений Павлович был по-товарищески прост, хотя и не терпел панибратства и неуважительного отношения. Вместе с тем, он всегда был готов помочь окружающим как в важных делах, так и в мелочах.

Евгений Павлович был отличным лектором. Речь неторопливая, содержательная, понятная. Перед аудиторией держал себя скромно, не артистично. Больше всего увлекала содержательная сторона лекций, которые Евгений Павлович наполнял яркими, образными примерами. Идеальный порядок всегда был на доске. Рисунки и графики исполнялись очень тщательно. То, что могло потребоваться в лекции повторно, никогда с доски не исчезало.

Он стремился донести до обучающихся сложные вопросы с помощью простой аргументации, объяснить, как говорят, "на пальцах". Все это вызывало у обучающихся интерес к предмету и желание посещать кружок военно-научного общества при кафедре.

Имя Евгения Павловича Попова как выдающегося ученого и великого гражданина своей страны, несомненно, вписано золотыми буквами в историю отечественной и мировой науки.

**A. A. Ardashov**, Senior researcher, **V. N. Arsen'ev**, Professor, **Yu. V. Gorichev**, Associate professor, **S. B. Silant'ev**, Professor, silantiev2008@yandex.ru, Military Space Academy named after A. F. Mozhayskogo

## **E. P. Popov in the Military Space Academy named after A. F. Mozhayskogo**

*The article is devoted to the 100 year jubilee of the prominent scientist awarded with three State Premium full member of Russian Academy of Sciences professor general-major E. P. Popov. We disclose the "Leningrad" period of his life, the years of his growing as a scientist, a teacher, as a founder and the head of the chair of the autonomous control systems in the Military Space Academy n.a. A. F. Mozhayskiy. A wide area of interests of the prominent person is illustrated. The history of his life may be useful as young as middle aged researcher to find the real orienteer to get new success in the science.*

**Ю. С. Володин**, канд. техн. наук, вице-президент компании "Артек Групп Инк.",  
**Б. Б. Михайлов**, канд. техн. наук, доц., **А. С. Юценко**, д-р техн. наук., проф., robot@bmstu.ru,  
 Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

## Поведение автономного мобильного робота в трехмерном мире

*Рассматривается задача управления сервисными роботами различного назначения при условии, что в рабочем пространстве могут оказываться препятствия, которые робот должен самостоятельно обнаружить и обойти либо выполнить над ними иные действия, заданные оператором. Обсуждается построение тактики робота с помощью естественных пространственных отношений, с использованием лингвистических переменных и нечеткого описания пространственной ситуации.*

**Ключевые слова:** мобильный робот, система объемного технического зрения, лингвистические переменные, нечеткая логика, функции принадлежности, нечеткое управление

### Введение

В настоящее время актуальной проблемой является создание мобильных роботов, способных функционировать автономно в условиях частично детерминированной среды. Одна из задач, часто возникающая при движении в такой среде, — это обход препятствий в условиях неопределенности, когда условия движения априори известны не полностью. Таким образом, возникают две взаимосвязанные задачи:

- определение (анализ) текущей ситуации на рабочей сцене и
- планирование движения робота с учетом полученной информации.

Одним из путей решения первой задачи является использование телевизионных систем объемного зрения (ТСОЗ) благодаря их способности распознавать объекты, измерять их размеры и координаты. Информация, получаемая от ТСОЗ, существенно зависит от типа и расположения объекта на рабочей сцене и, в общем случае, является неполной и нечеткой. Поэтому при анализе обстановки необходимо использовать алгоритмы нечеткой идентификации и вычисления параметров препятствий, необходимые для управления роботом. Соответственно, для решения второй задачи необходимо применять нечеткие процедуры управления автономного робота, включая задачи планирования маневра и коррекции траектории движения. Это дает возможность роботу самостоятельно корректировать курс и выбирать маневр объезда препятствий, т. е. в этом смысле можно говорить о поведении автономного мобильного робота. Ниже рассмотрены подходы к решению этих задач с использованием методов нечеткой логики.

### 1. Анализ ситуации с использованием телевизионной системы объемного зрения

Решение задачи анализа ситуации может быть найдено с помощью ТСОЗ, использующей структурную подсветку объекта. Система включает в себя обычную телевизионную камеру и элемент импульсной подсветки, проецирующий на рабочую сцену

плоский рисунок, искажаемый за счет рельефа сцены [1]. Результатом обработки полученного изображения является объемное описание рабочей сцены, для каждой точки которой определены три координаты в системе координат робота.

Далее выполняются сегментация сцены путем ее разделения на отдельные плоскости и выделение объектов. В качестве критериев сегментации используются дифференциальные геометрические инварианты — средняя и гауссова кривизны поверхности в точке. Обнаружение препятствий понимается как определение на рабочей сцене объектов, высота которых превышает уровень поверхности движения (нулевой) на заданное пороговое значение.

Для того чтобы планировать поведение робота в пространстве с препятствиями, недостаточно получить объемное изображение рельефа сцены. Необходимо провести идентификацию препятствий с тем, чтобы использовать заранее заложенные в базу знаний робота алгоритмы поведения. Для этого проводится фазификация (приведение к нечеткости) геометрических признаков обнаруженных на рабочей сцене объектов, воспринимаемых как препятствия, и их сравнение с признаками типовых объектов — эталонов, имеющих в базе данных. К таким признакам можно отнести, в частности, основные параметры объектов — его ширину  $W$  и высоту  $H$ , а также признаки, характеризующие взаимное положение объекта-препятствия и робота:  $D$  — расстояние до препятствия;  $L$  и  $R$  — расстояние от оси робота до левого и правого края препятствия соответственно.

Заметим, что определение геометрических характеристик объекта, например его габаритных размеров, может потребовать специальных гностических движений, в частности, определенной ориентации робота или ТСОЗ относительно объекта. После этого определяются координаты краев (границ) препятствия в системе координат  $OXYZ$ , связанной с роботом. Разности между этими координатами по каждой оси соответственно являются габаритными размерами объекта, находящегося в поле зрения системы.

В результате анализа ситуаций, характерных для работы внутри помещений, были определены типовые препятствия, возникающие в процессе движения, такие как "Стена", "Дверь", "Порог", "Блок" и некоторые другие. Типовые препятствия представляются в базе данных векторами нечетких признаков, полученными от системы объемного зрения. Это координаты и размеры объекта, взаимное расположение объектов, геометрические характеристики формы поверхности, структурные описания сцены и т. п., например, "объект протяженный, плоский, горизонтальный, невысокий, справа, недалеко". Использование лингвистических переменных, соответствующих естественному языку, позволяет пользователю легко расширить список возможных объектов сцены путем задания их характерных признаков.

Отметим, что нечеткие признаки позволяют идентифицировать объект и при фрагментарном описании объектов рабочей сцены, вызванном загромождением или затенением объектов при конкретном ракурсе наблюдения. В случае, когда признаков недостаточно для распознавания объектов или возникает неоднозначность решения задачи идентификации, эти же признаки позволяют организовать когнитивное поведение робота, направленное на поиск недостающей для распознавания информации, например, на выбор нужной позиции наблюдения.

Алгоритм идентификации препятствий представляет собой систему нечеткого логического вывода, оперирующую с набором правил классификации и признаками объектов-эталонов, которые составляют базу знаний о препятствиях. База знаний о препятствиях помимо производственных правил классификации объектов содержит заранее определенные схемы маневрирования.

Нечеткие признаки объектов (протяженный объект, большая высота, большой размер и т. п.) задаются функциями принадлежности соответствующих лингвистических переменных. При этом функции принадлежности должны быть согласованы с техническими характеристиками мобильного робота и системы зрения. Например, признак "достаточность ширины дверного проема" задается габаритными размерами снаряженного робота, признак "небольшая высота" зависит от характеристик шасси робота, функция принадлежности нечеткого множества "далеко" ограничена рабочим диапазоном системы зрения и т. д. Функции принадлежности задаются до начала движения; их параметры определяются на этапе калибровки технической системы зрения в составе конкретного мобильного робота [2].

Нечеткий классификатор осуществляет процедуру нечеткого вывода Мамдани, в результате которого на этапе дефазификации (приведения к четкости) определяется класс объекта. В качестве метода дефазификации использован метод первого максимума. Заметим, что носитель каждого из нечетких множеств, соответствующих классам препятствий, — это единственная точка (синглетон). Также следует

отметить, что выбор нечетких признаков классификации, соответствующих им функций принадлежности и производственных правил в значительной степени определяется спецификой задачи, решаемой робототехнической системой, и может различаться в зависимости от того, какие свойства препятствий являются существенными при разбиении на классы в каждом конкретном случае.

Состояние внешнего мира робота (текущая ситуация) описывается системой бинарных фреймов ( $\langle \text{объект } m \rangle$ ,  $\langle \text{отношение} \rangle$ ,  $\langle \text{объект } m + 1 \rangle$ ),  $m = 1, 2, \dots, M$ , где в качестве одного из объектов может выступать робот или внешний наблюдатель. Если установлены нечеткие отношения между всеми объектами, которые находятся в поле зрения робота в процессе движения, то мы получим нечеткую семантическую сеть, или нечеткую карту. Используя такую карту, легко осуществлять навигацию робота по наблюдаемым реперам, т. е. по объектам, положение которых было заранее известно. Определив свое положение по реперам, робот может установить свое отношение к ненаблюдаемой цели и определить требуемое направление движения.

Особенность задачи управления мобильным роботом с использованием нечеткой модели рабочей сцены состоит в том, что в процессе движения меняется масштаб изображения, воспринимаемого телекамерой, установленной на роботе. Этот эффект приводит к необходимости введения трехмерной функции принадлежности [1]. При этом одной из переменных является дальность до препятствия. Так, для термов, являющихся множеством значений лингвистической переменной "Высота объекта", функции принадлежности вводятся с учетом параметров системы зрения и места ее крепления на шасси робота. Аналогично в зависимости от дистанции меняются и функции принадлежности по ориентации: "слева", "справа" (см. ниже, раздел 2).

## 2. Планирование поведения мобильного робота в трехмерном мире

Термин "поведение" нам кажется уместным применить для определения способа функционирования автономного робота во внешней, заранее не полностью определенной среде. Можно априори выделить стереотипы поведения, определяемые сложившейся ситуацией. Их иногда рассматривают как аналог условно-рефлекторного поведения "стимул—реакция". Эти стереотипы поведения имеют вид производственных правил: "если ситуация есть  $S_i$ , то тактика  $T_i$ ". Под тактикой здесь понимается совокупность правил поведения, выраженных с помощью лингвистических переменных и определяемых поставленной целью. Эти правила ставят в соответствие типовой ситуации заранее определенное типовое движение робота. Например: "Если препятствие типа "блок" близко слева, то обходить его в положительном направлении". Аналогично, каждое типовое движение является результатом анализа совокупности нечетких правил [3]. В данном

случае это движение можно описать так: *обойти препятствие в положительном направлении*. Нечеткий контроллер преобразует полученные данные системы зрения в сигналы управления, регулирующие линейную и угловую скорости робота. Очевидно, что типовые ситуации можно заранее заложить в нечеткую базу знаний робота. С использованием этой базы можно составить совокупность правил поведения (тактик), соответствующих решаемой задаче, таких как преследование нового объекта, выход в определенную точку рабочей сцены, заданную на электронной карте, проход в дверной проем, обход внезапно появившегося препятствия и т. п.

В общем случае тактика поведения робота определяется фреймом задачи, который можно представить в следующем виде:  $\langle \text{текущая ситуация } S_i \rangle \langle \text{объект управления } a_0 \rangle \langle \text{имя операции} \rangle \langle \text{сопутствующие объекты}_j \rangle \langle \text{условия выполнимости операции} \rangle$ . Объектом управления по умолчанию является сам мобильный робот, параметры которого имеются в базе данных. Эти параметры (габаритные размеры, масса, мощности движителей, скорость, маневренность и т. п.) определяют условия выполнимости операции с учетом текущей ситуации и свойств рабочей среды (рельефа, сцепления колес с грунтом, несущих свойств грунта, характера препятствий и т. д.). Условия выполнимости операции могут включать в себя и проверку постусловий, которые должны быть выполнены после завершения операции. Например, невозможно движение робота через дверной проем, меньший по размерам, чем база робота, или его установка на наклонной поверхности с большим углом наклона. Условия выполнимости операции могут потребовать выполнения специальных поисковых движений, направленных на получение дополнительной информации, которые мы относим к "гностическим операциям" и описание которых также должны содержаться в базе знаний робота. К сопутствующим объектам мы относим, например, обнаруженное препятствие или преследуемый объект, которые должны быть классифицированы по своим признакам.

Система знаний мобильного робота, перемещающегося в пространстве с препятствиями, может включать ряд тактик поведения, которые могут активизироваться как ситуацией, например, появлением препятствия определенного вида (эскарп, контрэскарп, проем, лестница и т. п.), так и командами оператора. Команда оператора обычно включает только два элемента:  $\langle \text{имя операции} \rangle \langle \text{сопутствующие объекты}_j \rangle$ . Например,  $\langle \text{преодолеть} \rangle \langle \text{порог } P \rangle$ . В этом случае формализация текущей ситуации и проверка условий выполнимости операции должна выполняться самой системой. Оператор может сообразить роботу только конечную цель движения в пространстве с частично известной структурой. Тогда возникает задача автономного планирования движения. Ее решение обеспечивает формирование траектории в пространстве с известными препятствиями, обладающей наилучшими в том или ином смысле показателями качества, и переплани-

рование этой траектории при появлении непредвиденных препятствий.

Особой формой поведения мобильного робота может быть упомянутая выше операция гностического типа. Если слот фрейма операции, соответствующий условиям ее достижимости, не заполнен, то робот должен самостоятельно определить, выдерживаются ли эти условия. Например, робот может искать выход из помещения с учетом своих габаритных размеров. Такого рода гностические операции предварительно заносятся в базу знаний робота в виде системы нечетких ситуационных правил.

### 3. Экспериментальное исследование

В качестве апробации предложенного подхода на базе системы объемного зрения [1] была разработана система нечеткого вывода для идентификации препятствий. В экспериментах предполагалось, что все ситуации внешнего мира робота, перемещающегося внутри помещения, можно описать комбинацией объектов из следующего набора типовых препятствий: "Стена", "Порог", "Блок", "Левый угол", "Правый угол", "Дверь". Любой объект, обнаруженный ТСОЗ, идентифицируется как один из типовых объектов и для него, с учетом вектора нечетких признаков, формируется соответствующая траектория.

Для построения системы, обладающей указанными возможностями, оказалось достаточным использовать следующие лингвистические переменные: "Положение объекта в поле зрения робота" {"*Справа*", "*Слева*", "*По центру*"}, "Высота объекта" {"*Высокий*", "*Средней высоты*", "*Низкий*"}, "Ширина объекта" {"*Протяженный*", "*Компактный*"}, "Дальность до объекта" {"*Опасная близость*", "*Безопасная дальность*", "*Дальняя граница зоны видимости*"}. Число термов в терм-множествах лингвистических переменных при необходимости всегда может быть увеличено.

Эксперимент проводили в лабораторных условиях с использованием мобильного робота, на платформе которого была установлена система объемного зрения, описанная в разделе 1 (рис. 1, а, см. вторую сторону обложки). В процессе экспериментов мобильный робот двигался из точки 1 в точку 2 при наличии препятствий (рис. 1, б, см. вторую сторону обложки). При этом их расположение не позволяло двигаться по прямой линии. Во время движения система зрения анализировала текущую ситуацию перед роботом, идентифицировала препятствия и определяла их размер и расположение. В результате был определен маршрут объезда с учетом габаритных размеров самого робота.

Как отмечалось выше, в процессе движения меняется масштаб изображения, воспринимаемого телекамерой, установленной на роботе. Этот эффект приводит к зависимости функции принадлежности от дальности до препятствия. Так, для термов, являющихся множеством значений лингвистической переменной "Высота объекта", функции принад-

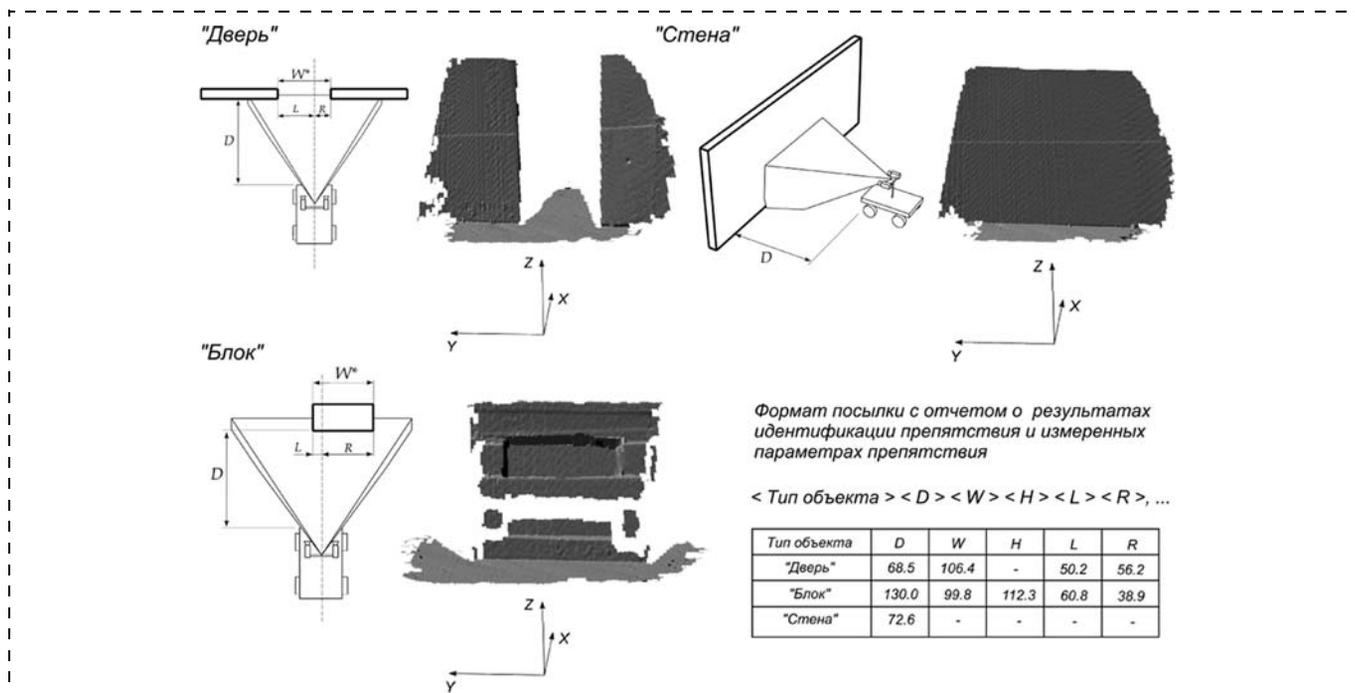


Рис. 4. Схемы объектов из набора "Типовые препятствия" и примеры их объемного описания с указанием измеряемых параметров

лежности введены с учетом угла установки системы зрения на шасси робота. Например, объект, выходящий по высоте из поля зрения системы на дальней границе рабочей зоны ТСОЗ, при сближении робота с объектом будет отнесен к значению "Средней высоты" (рис. 2, см. вторую сторону обложки). Аналогично, объект, расположенный по центру на границе рабочей зоны, оказывается справа вблизи (рис. 3, а, см. вторую сторону обложки). Таким образом, функция принадлежности является трехмерной; она показана на рис. 3, б (см. вторую сторону обложки).

Поскольку в процессе движения происходит поворот линии визирования, то одним из способов наведения робота на неподвижный объект, использующих предсказание его будущего положения относительно робота, является способ пропорциональной навигации. При этом управление в процессе сближения строится таким образом, чтобы угловая скорость робота была пропорциональна угловой скорости смещения линии визирования [4].

В соответствии с вычисленными нечеткими признаками выполняется идентификация препятствий. Для этого используются продукционные правила, например: "Блок — невысокий, компактный объект", "Порог — протяженный низкий объект", "Левый угол — высокий либо средней высоты объект слева от робота", "Стена — протяженный высокий объект в центре поля зрения". Заметим, что особенностью подхода является конъюнкция признаков, относящихся к объекту рабочей сцены и к его расположению. При таком подходе мы переходим от описания отдельных объектов к описанию ситуаций.

Пример результатов реального эксперимента с мобильным роботом, обнаружившим объект типа

"Дверь", приведен на рис. 4. Класс объектов "Дверь" описывается как "высокий объект слева ("левый угол") и высокий объект справа ("правый угол") на примерно одинаковом расстоянии от робота".

Алгоритмы объезда препятствий формировались с помощью нечетких продукционных правил, описанных выше. Заметим, что при объезде препятствий наличие в базе данных сцены не только описаний объектов, но и отношений между ними позволяет решать ситуационные задачи, например, ответить на вопрос о том, не заблокирован ли дверной проем другим препятствием. Такая ситуация, в частности, соответствует случаю, когда объект "Блок" находится между объектами "Левый угол" и "Правый угол", составляющими объект "Дверь".

Если робот подъезжает к препятствию типа "Стена" не под прямым углом, то следует определить положение стены относительно робота (слева или справа) и угол между стеной и направлением движения робота, чтобы робот мог изменить траекторию и двигаться вдоль стены (рис. 5). В этом случае для объекта рассчитывается расстояние вдоль

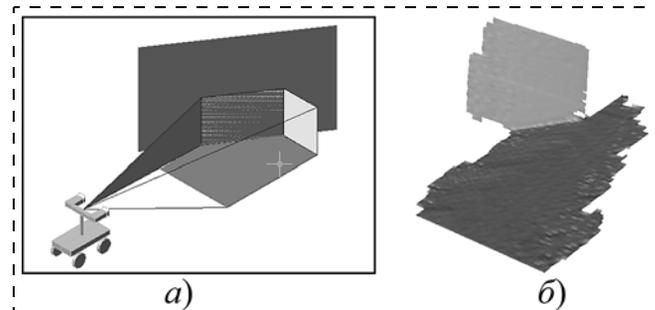


Рис. 5. Объект "Стена", расположенный под углом к направлению движения робота: схема объекта (а) и его объемное описание (б)

оси  $X$  до ближайшей точки препятствия в поле зрения, расстояние до этой точки от осевой линии робота, а также угол между направлением движения робота и стеной.

Учет зависимости функции принадлежности от дальности (см. рис. 2, 3 на второй стороне обложки) позволил заблаговременно начать маневр, например, объезд препятствия по плавной траектории, без остановки робота. Это обстоятельство повысило безопасность работы, исключив возможность столкновения с препятствием. Планирование с опережением особенно важно при наличии движущихся объектов на рабочей сцене, поскольку это позволяет провести коррекцию траектории таким образом, чтобы избежать столкновения.

### Заключение

Результаты экспериментов подтвердили работоспособность разработанных алгоритмов обнаружения и идентификации препятствий на пути движения мобильного робота. Показано, что разработанное программное обеспечение системы объемного зрения мобильного робота позволяет ему самостоятельно выполнять поставленную задачу в условиях частично детерминированной рабочей среды.

Алгоритмы управления, основанные на использовании нечеткой логики, позволяют по получаемым данным от ТСОЗ обеспечить автономное управление роботом в условиях неопределенности. Заложив определенные правила поведения в программу

управления роботом, мы обеспечиваем его автономное поведение, косвенно основанное на нашем собственном опыте. Лингвистические переменные позволяют существенно облегчить решение как задач распознавания и классификации объектов, так и задач планирования движения, поскольку правила поведения задаются с помощью естественных для человека отношений пространства и времени. Таким образом, можно ожидать, что описание поведения мобильных роботов в условиях неопределенности с помощью естественных отношений пространства и времени найдут широкое применение, прежде всего, при управлении роботами сервистого типа.

### Список литературы

1. Ющенко А. С., Михайлов Б. Б., Володин Ю. С. Нечеткая классификация препятствий мобильным роботом с использованием телевизионной системы зрения // Сб. научных трудов 6-й конференции "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". Коломна, 2011. Т. 1. С. 372–381.
2. Володин Ю. С., Михайлов Б. Б., Орлов А. И. Калибровка 3D-системы технического зрения // Труды 16-й конференции "Экстремальная робототехника". 2005. С. 314–322.
3. Ющенко А. С. Методы нечеткой логики в управлении мобильными манипуляционными роботами // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спецвыпуск № 6. С. 29–43.
4. Ющенко А. С., Тачков А. А. Интегрированная система управления пожарным разведывательным роботом // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спецвыпуск № 6. С. 106–119.

Yu. S. Volodin, VP, Research and Development Artec Group, Inc.,  
B. B. Mikhailov, Associate professor, A. S. Yushenko, Professor, robot@bmstu.ru  
Bauman Moscow State Technical University

## Autonomous Mobile Robot Behavior in 3D World

*To control a mobile robot the operator usually prescribes only the finite aim of the movement. At the same time there are unknown objects may be appeared in the working space which the robot must discover, recognize and avoid itself or to operate with them in accordance with the prescribed task. That is why one of the most urgent problems in robotics now is the autonomous control of mobile robots in the partially undetermined environment. One of the problems to solve by the robot control system is the previously unknown obstacles avoidance. The situation is the same indoors as well as outdoors. To solve the problem of the avoidance recognition the 3D computer vision systems may be applied. Such systems are capable to recognize the objects appeared on the working space and appreciate their dimension and coordinates.*

*It allows the control system of robot to plan the necessary maneuver to avoid the obstacles and to correct the trajectories of movement. The information received by the control system from the 3D computer vision systems usually is uncompleted and fuzzy. That is why it the algorithms of on-board fuzzy identification of the obstacles are necessary to apply to control robot movement. The control algorithms also become fuzzy. The tactics of robot may be determined using the natural relations of space and time and linguistic variables. Such approach needs also the fuzzy description of the current situation in the 3D world. So the fuzzy logic approach may be effectively applied to solve the both problems: the working scene identification and the movement of robot control. That is the problem of autonomous robot behavior in 3D world.*

**Keywords:** mobile robot, 3D computer vision system, linguistic variables, fuzzy logic, membership functions, fuzzy control

### References

1. Yushchenko A. S., Mikhailov B. B., Volodin Yu. S. Nечеткая классификация препятствий мобильным роботом с использованием телевизионной системы зрения. Сб. научных трудов 6-й конференции "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". Коломна, 2011. V. 1. P. 372–381.

2. Volodin Yu. S., Mikhailov B. B., Orlov A. I. Калибровка 3D-системы технического зрения. Труды 16-й конференции "Экстремальная робототехника". 2005. P. 314–322.
3. Yushchenko A. S. Методы нечеткой логики в управлении мобильными манипуляционными роботами. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спецвыпуск N. 6. P. 29–43.
4. Yushchenko A. S., Tachkov A. A. Интегрированная система управления пожарным разведывательным роботом. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спецвыпуск N. 6. P. 106–119.

**А. А. Минин**, канд. техн. наук, нач. отдела, muhuh@yandex.ru,

**А. В. Назарова**, канд. техн. наук, доц., avn@.bmstu.ru,

**Т. П. Рыжова**, канд. техн. наук, науч. сотр., tatiana281186@yandex.ru,

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

## Распределение задач в децентрализованной робототехнической системе

*Рассмотрены вопросы управления мультиагентной робототехнической системой, предназначенной для выполнения разведывательных и поисково-спасательных операций на различных опасных объектах. Приведена структура программной части системы управления коллективом роботов. Рассмотрен децентрализованный алгоритм распределения задач в группе роботов. Приведены подходы к построению коммуникационной системы и организации информационного обмена между роботами, входящими в состав коллектива.*

**Ключевые слова:** мультиагентная робототехническая система, система управления, коллектив роботов, децентрализованный алгоритм распределения целей, коммуникационная система, информационный обмен

### Введение

В настоящее время широко развивается направление робототехники, связанное с управлением коллективами мобильных роботов. Подобные специализированные робототехнические комплексы могут успешно применяться при решении различных сложных задач, которые не может эффективно выполнить отдельно взятый мобильный робот. Такие задачи целесообразно решать с помощью мультиагентной робототехнической системы — группировки (коллектива) взаимодействующих мобильных роботов, обладающих различными функциональными возможностями. Одной из наиболее важных проблем группового управления является распределение задач (целей) в коллективе роботов.

В зависимости от используемой стратегии группового управления выделяют три типа распределенных систем — централизованные, децентрализованные и гибридные. В централизованных системах процесс распределения целей происходит под управлением единого центра. В децентрализованных системах такой центр отсутствует, распределение заданий происходит в процессе взаимодействия роботов. Гибридная система — это комбинация централизованной и децентрализованной систем. Такой подход подразумевает разбиение коллектива роботов на отдельные группы-кластеры, в каждой из которых присутствует робот-лидер, выполняющий роль управляющего центра. При этом лидеры взаимодействуют между собой, используя децентрализованный принцип управления [1, 2].

Статья посвящена вопросам распределения целей в коллективах мобильных роботов, использующих децентрализованную или гибридную стратегию группового управления.

### Общая концепция построения мультиагентной робототехнической системы

Вопросы управления группой мобильных роботов рассмотрим на примере мультиагентной робототех-

нической системы (МРТС), разработанной сотрудниками НУЦ "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана и предназначенной для проведения разведывательных операций на различных опасных объектах. В состав МРТС входят командный пункт и коллектив автономных мобильных роботов, оснащенных специальным оборудованием [3].

Функции командного пункта заключаются в определении набора задач, которые должен выполнить коллектив роботов, и в обработке данных, поступающих от роботов при выполнении ими заданий.

Каждый робот, входящий в состав группы, может обмениваться данными со всеми остальными роботами группы и с командным пунктом. На основании такого информационного обмена роботы самостоятельно принимают решения о выборе задач, предварительно согласовав эти решения между собой. Кроме того, каждый робот оснащен системой автодвижения и способен в автоматическом режиме перемещаться к заданной цели в заранее неизвестной среде с различными статическими и динамическими препятствиями.

Принцип работы МРТС удобно объяснить на примере решения следующей задачи. Предположим, в рабочей зоне расположены  $m$  объектов, которые необходимо исследовать с помощью  $n$  роботов, входящих в состав системы. В общем случае  $n < m$ . Командный пункт по изображению, полученному видеокамерами, распознает требуемые объекты, определяет их число и координаты и отправляет эти значения всем роботам, входящим в состав МРТС. Получив параметры целей, роботы с помощью информационного обмена распределяют эти цели между собой в соответствии с заданным критерием оптимальности. Выбрав цели, роботы в автоматическом режиме перемещаются к соответствующим объектам, исследуют их и передают полученную информацию на командный пункт. Последний при получении информации от роботов исключает исследованные объекты из списка задач и отправляет роботам новый набор целей, который содержит ко-

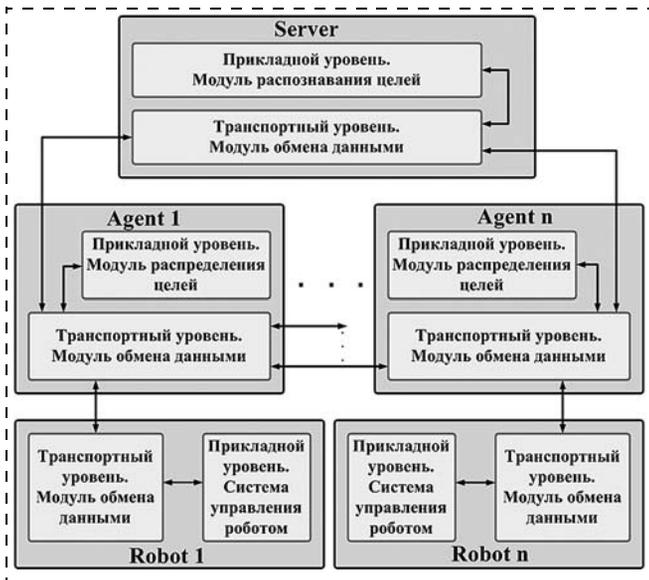


Рис. 1. Укрупненная структура программной части системы управления МРТС

ординаты еще неисследованных объектов. Роботы, свободные от выполнения заданий, снова распределяют цели между собой и выполняют выбранные задачи. Процесс повторяется до тех пор, пока не будут обследованы все распознанные объекты.

На рис. 1 приведена укрупненная схема программной части системы управления МРТС. Она содержит программные модули трех типов: **Server**, **Agent** и **Robot**. Программный модуль **Server** реализует систему управления командным пунктом (верхний уровень системы управления МРТС). Модуль **Agent** отвечает за коллективное поведение роботов (средний уровень), а модуль **Robot** — это система управления роботом (нижний уровень). Модули **Agent** и **Robot** установлены на борту каждого робота, входящего в состав МРТС.

Каждый из рассмотренных модулей включает прикладной и транспортный уровни. Прикладной уровень модулей **Server**, **Agent** и **Robot** отвечает за выполнение алгоритмов управления командным пунктом, группой роботов и отдельным роботом соответственно. Так, прикладной уровень командного пункта выполняет распознавание исследуемых объектов, определяет их число и локализацию в рабочей зоне. Прикладной уровень модуля **Agent** распределяет цели в коллективе роботов, т. е. осуществляет выбор задачи для данного робота, согласованный с остальными роботами коллектива. И, наконец, прикладной уровень модуля **Robot** отвечает за управление роботом, включая сенсорную и навигационную системы, автодвижение, управление специальным оборудованием и приводами.

Транспортный уровень программных модулей отвечает за передачу данных между отдельными уровнями и модулями системы управления МРТС. Транспортный уровень реализован с использованием библиотеки обмена сообщениями ZeroMQ [4].

Библиотека ZeroMQ (Message Queue) позволяет организовать быстрый асинхронный обмен данными между высоконагруженными приложениями и поддерживает такие транспортные протоколы, как TCP, PGM, IPC и другие. ZeroMQ, по сравнению с другими библиотеками обмена данными, такими как ActiveMQ, WebSphereMQ и RabbitMQ, имеет ряд преимуществ, среди которых — высокая производительность, простота, поддержка более чем 20 языков программирования. Прикладной программный интерфейс библиотеки использует сокеты и поддерживает следующие типы обмена сообщениями: "пара сокетов" (pair), "запрос—ответ" (request/reply), "издатель—подписчик" (publisher/subscriber), "параллельная рассылка" (pipeline) [5].

Для дальнейшего описания транспортного уровня системы управления МРТС необходимо сначала дать определение некоторым понятиям, используемым в ZeroMQ. Сокет — это программный интерфейс, предназначенный для обмена данными между процессами. При этом процессы могут выполняться как на одной ЭВМ, так и на различных ЭВМ, связанных между собой сетью. Сокет — это абстрактный объект, представляющий конечную точку соединения. Сокеты характеризуются тремя параметрами: типом взаимодействия, пространством имен и протоколом. Тип информационного взаимодействия (request/reply, publisher/subscriber и т. п.) определяет, как данные будут обработаны и как они передаются от отправителя получателю. Пространство имен — это адреса, с помощью которых выполняется подключение сокетов. Например, при сетевом взаимодействии адрес сокета содержит IP-адрес компьютера, подключенного к сети, и номер порта, который идентифицирует данный сокет среди множества других сокетов этого компьютера. Транспортный протокол определяет, как передаются данные [6].

Следует различать клиентские и серверные сокеты. Модель "клиент—сервер" — это вычислительная или сетевая архитектура, в которой поставщик услуг или данных называется сервером, а заказчик этих услуг — клиентом.

В МРТС использован поддерживаемый библиотекой ZeroMQ тип информационного обмена "издатель—подписчик" и транспортный протокол TCP (рис. 2). Тип обмена "издатель—подписчик" предполагает, что программа-сервер (издатель) отправляет сообщения через сокет типа **PUB** (publisher) для множества программ-клиентов (подписчиков) без получения уведомлений о доставке. При этом отправленную сервером-издателем информацию получают только те клиенты, которые предварительно подписались на сообщения данного типа. Кроме того, возможен способ подписки клиента на сообщения нескольких публикующих серверов. Таким образом, клиент-подписчик, используя сокет типа **SUB** (subscriber), будет получать только интересующую его информацию.

Каждый программный модуль системы управления МРТС, в зависимости от выполняемых в

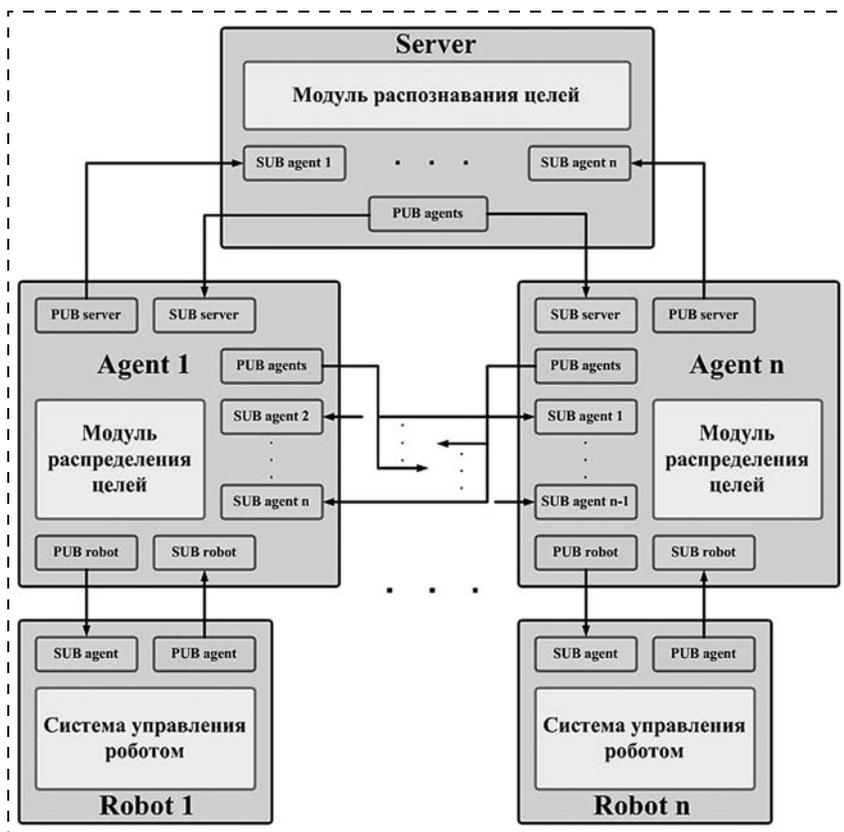


Рис. 2. Детализированная структура программной части системы управления МРТС

данный момент действий, может быть как сервером-издателем, так и клиентом-подписчиком.

Например, модуль **Server** передает данные о распознанных объектах роботам через сокет **PUB server**. В этот момент модуль работает как сервер-издатель. Напротив, при получении данных от группы роботов модуль **Server** является клиентом-подписчиком множества роботов-издателей. Для получения данных от  $n$  роботов модуль **Server** использует  $n$  сокетов **SUB agent  $i$** ,  $i = 1, \dots, n$ .

Аналогично, программный модуль **Agent** имеет следующие сокеты:

- сокеты **PUB server** и **SUB server** для обмена данными с модулем **Server**;
- один сокет **PUB agents** и  $n - 1$  сокет **SUB agent  $i$**  для обмена сообщениями с другими роботами коллектива;
- сокеты **PUB robot** и **SUB robot** для обмена информацией с системой управления роботом (модуль **Robot**).

Программный модуль **Robot** имеет два сокета (**PUB agent** и **SUB agent**), предназначенных для информационного обмена с модулем **Agent**.

### Распределение целей

Как было сказано ранее, программный модуль **Agent** реализует децентрализованное распределение целей на основе информационного обмена между роботами, входящими в состав МРТС. Для решения

этой задачи разработан специальный алгоритм, который включает в себя следующую последовательность шагов:

**Шаг 1.** Нумерация роботов и целей. Каждому роботу, входящему в состав коллектива, и каждой цели присваивается порядковый номер (1, ...,  $n$  и 1, ...,  $m$  соответственно). Нумерацию выполняет модуль **Server**.

**Шаг 2.** Получение набора целей. Каждый робот, входящий в состав МРТС, получает от сервера-издателя (командный пункт) исходные данные обо всех распознанных объектах-целях: число целей, номер и координаты каждой цели в рабочем пространстве.

**Шаг 3.** Получение информации от роботов. Каждый робот получает от остальных роботов сообщение, которое содержит текущие координаты ответившего робота, его текущее состояние (**Занят/Свободен**) и номер выбранной цели (если **Занят**). На основе полученной информации формируются два массива: массив  $\mathbf{N} = \{n_i\}$  номеров свободных роботов,  $i = 1, \dots, n_f$ , где  $n_f$  — число свободных роботов; массив  $\mathbf{M} = \{m_j\}$  номеров нераспределенных целей,  $j = 1, \dots, m_f$ , где  $m_f$  —

число нераспределенных целей. Каждой  $j$ -й задаче, выполняемой  $i$ -м роботом, ставится в соответствие величина  $c_{ij}$  — "стоимость" (или "цена") выполнения этим роботом данной задачи, т. е. критерий оптимальности. В целях упрощения будем считать, что критерием оптимальности распределения целей является расстояние до выбираемой цели. Оно должно быть минимальным. Тогда, робот вычисляет ценовую матрицу  $\mathbf{C} = \{c_{ij}\}$ , каждый элемент которой  $c_{ij}$  — это расстояние между  $i$ -м свободным роботом и  $j$ -й нераспределенной целью.

**Шаг 4.** Выбор цели. Шаг выполняется, если текущее состояние робота **Свободен**. Цели могут иметь заданный приоритет. Если приоритет задан, то выбирается цель, имеющая наивысший приоритет. Если приоритет не задан, то выбирается цель, имеющая, например, наименьший номер. Предположим, выбрана  $k$ -я цель из массива  $\mathbf{M}$ , что соответствует строке  $\{c_{kj}\}$  матрицы  $\mathbf{C}$ . Тогда в этой строке выбирается элемент  $c_{k\_min} = c_{kl}$ , имеющий наименьшее значение и соответствующий номеру  $l$  свободного робота из массива  $\mathbf{N}$ . Если номер данного робота равен  $l$ , то робот выбирает  $k$ -ю цель. Если это условие не выполняется, то шаг 4 повторяется для цели, имеющей следующий по значению приоритет (или для следующей по номеру цели при отсутствии приоритетов). Выполнение шага 4 происходит до тех пор, пока для данного робота не будет выбрана оптимальная цель или не будут проверены все цели из массива  $\mathbf{M}$ . Если цель выбрана,

то робот меняет свое состояние **Свободен** на состояние **Занят**.

**Шаг 5.** Робот отправляет информацию о себе (текущие координаты, состояние и номер выбранной цели) остальным роботам коллектива.

**Шаг 6.** Отправка номера и координат выбранной цели модулю **Robot** и переход к шагу 1.

Следует отметить, что при таком подходе возможно возникновение конфликтных ситуаций. Например, робот, находясь в состоянии **Занят**, при прохождении шага 3 получает информацию, что выполняемое им задание также выбрано другим роботом. В этом случае данная цель назначается тому роботу, у которого меньше "цена" или, если "цены" одинаковы, больше значение номера. При этом робот с большей "ценой" или с "младшим" номером отказывается от выполнения данной задачи и переходит к выбору новой цели.

**Пример.** Рассмотрим коллектив, состоящий из  $n = 9$  роботов. В рабочей зоне расположено шесть целевых точек, в каждую из которых должен переместиться один из роботов коллектива. Таким образом, необходимо распределить в коллективе  $m = 6$  задач. Критерием оптимальности является время выполнения каждой задачи. Цели имеют одинаковый приоритет. Расположение роботов и целевых точек в рабочей зоне показано на рис. 3.

Время перемещения зависит от расстояния между роботом и целевой точкой. Соответствующая ценовая матрица **C** приведена в табл. 1.

**1-я итерация.** Для целевой точки 1 наименьшее расстояние  $c_{21} = 1$ . Это соответствует роботу 2. Точка 1 назначается в качестве целевой для робота 2. Строка 2 и столбец 1 исключаются из ценовой матрицы (табл. 2).

**2-я итерация.** Для целевой точки 2 наименьшей является стоимость  $c_{42} = 1$ , которая соответствует роботу 4. Точка 2 назначается в качестве целевой для робота 4. Строка 4 и столбец 2 исключаются из матрицы цен (табл. 3).

**3-я итерация.** Для целевой точки 3 наименьшая стоимость  $c_{93} = 1$ . Это соответствует роботу 9. Точка 3 назначается в качестве целевой для робота 9.

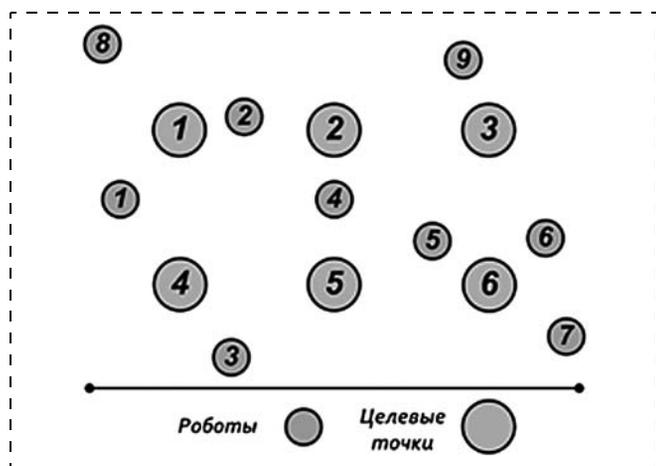


Рис. 3. Расположение роботов и целевых точек в рабочей зоне

Строка 9 и столбец 3 исключаются из таблицы, а точка 3 исключается из матрицы цен (табл. 4).

Для оставшихся целевых точек выполняются аналогичные действия. Результат работы алгоритма приведен на рис. 4.

На рис. 4 стрелками указаны полученные пары "робот—целевая точка", а цифра обозначает рас-

Таблица 1

Матрица цен

Робот	Задача					
	1	2	3	4	5	6
1	2	8	15	3	8	15
2	1	2	9	6	6	11
3	9	10	14	2	4	10
4	6	1	6	6	2	6
5	10	5	3	9	3	1
6	15	8	4	14	8	1
7	18	12	8	15	9	2
8	3	9	16	9	13	18
9	11	4	1	14	10	8

Таблица 2

Матрица цен после 1-й итерации

Робот	Задача				
	2	3	4	5	6
1	8	15	3	8	15
3	10	14	2	4	10
4	1	6	6	2	6
5	5	3	9	3	1
6	8	4	14	8	1
7	12	8	15	9	2
8	9	16	9	13	18
9	4	1	14	10	8

Таблица 3

Матрица цен после 2-й итерации

Робот	Задача			
	3	4	5	6
1	15	3	8	15
3	14	2	4	10
5	3	9	3	1
6	4	14	8	1
7	8	15	9	2
8	16	9	13	18
9	1	14	10	8

Таблица 4

Матрица цен после 3-й итерации

Робот	Задача		
	4	5	6
1	3	8	15
3	2	4	10
5	9	3	1
6	14	8	1
7	15	9	2
8	9	13	18

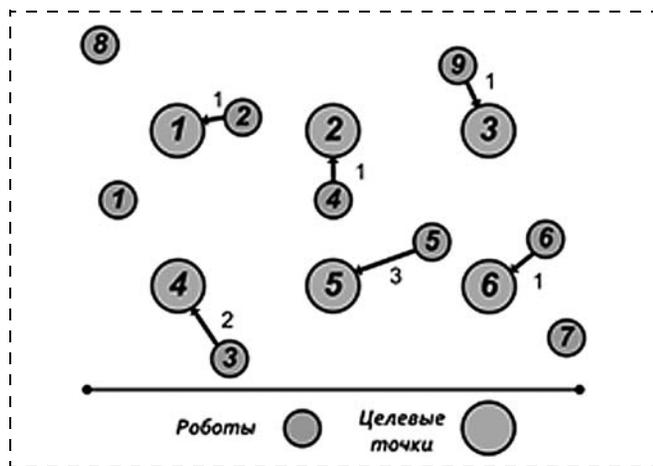


Рис. 4. Результат работы алгоритма распределения задач в коллективе роботов

стояние между роботом и соответствующей целевой точкой. Из рис. 4 видно, что роботы выбрали ближайшие целевые точки.

### Заключение

Мультиагентные робототехнические системы, использующие децентрализованную стратегию управления, по сравнению с централизованными аналогами имеют более высокие показатели надежности и быстродействия, обладают способностью к самоорганизации и самовосстановлению. Кроме того, децентрализованные системы обладают свойством "гибкости" и масштабируемости.

В статье рассмотрены общие подходы к построению мультиагентной робототехнической системы. Приведены укрупненная и детализирован-

ная структуры программной части системы управления разработанной МРТС. Система управления МРТС, построенная по модульному принципу, является в некоторой степени универсальной и может быть использована в других мультиагентных системах. Для этого достаточно заменить или модифицировать некоторые модули системы, которые являются специализированными.

В статье приведена структура коммуникационной системы и подробно изложен разработанный децентрализованный алгоритм распределения целей в коллективе роботов. Данный алгоритм позволяет роботам, входящим в состав группировки, самостоятельно принимать оптимальные и при этом согласованные друг с другом решения относительно выбора задачи или целевой точки. Алгоритм формализован таким образом, что может быть применим для решения множества задач, связанных с распределением ресурсов.

### Список литературы

1. **Интеллектуальные роботы** / И. А. Каляев, В. М. Лохин, И. М. Макаров и др. Под общ. ред. И. Е. Юревича. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.
2. **Многоагентные системы**. URL: <http://www.aiportal.ru/articles/multiagent-systems/1/> (дата обращения 08.04.2014).
3. **Назарова А. В., Рыжова Т. П.** Методы и алгоритмы мультиагентного управления робототехнической системой // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. № 6. С. 93–105.
4. **Code Connected — ZeroMQ**. URL: <http://zeromq.org> (дата обращения 10.04.2014).
5. **Введение** в систему обмена сообщениями ZeroMQ. URL: <http://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=27137> (дата обращения 10.04.2014).
6. **Танаев А.** Программирование сокетов. URL <http://wist.ifmo.ru/info/index.html> (дата обращения 21.04.2014).

**A. A. Minin**, Head of section, [muhuh@yandex.ru](mailto:muhuh@yandex.ru), **A. V. Nazarova**, Associate professor, [avn@bmstu.ru](mailto:avn@bmstu.ru), **T. P. Ryzhova**, Research assistant, [tatiana281186@yandex.ru](mailto:tatiana281186@yandex.ru), Bauman Moscow State Technical University

## The Task Distribution in Decentralize Robotic System

*Problems of control of the multiagent robotic system are considered. Various strategies of robot team control are viewed. In this multiagent robotic system is used decentralize strategy of robot team control.*

*The control system of robot team is designed as a modular hierarchic structure. Each of the modules is performing separate task. Enlarged structure and detailed structure of robotic system software are described.*

*The communication system of robot team and principle of data exchange are described. Communication protocol is considered. In this system is used ZeroMQ communication programming library. The "Publisher/subscriber" principle of data exchange is employed in this communication structure.*

*The decentralize algorithm of the tasks distribution between robots is considered. This algorithm is based on data exchange between robots. Each robot sends its coordinates, its status and its target point. Each robot receives these messages from all robots, handles received data and takes decision about choice of target point.*

**Keywords:** multiagent robotic system, decentralize strategy, control system, robot team, "Publisher/subscriber" principle, data exchange, ZeroMQ communication library, decentralize algorithm of the tasks distribution, communication system, target point

### References

1. **Интеллектуаль'ные роботы**. I. A. Kalyaev, V. M. Lokhin, I. M. Makarov i dr. Ed. I. E. Yurevicha. M.: Mashinostroenie, 2007. 360 p.
2. **Многоагентные системы**. URL: <http://www.aiportal.ru/articles/multiagent-systems/1/> (date of access 08.04.2014).
3. **Nazarova A. V., Ryzhova T. P.** Metody i algoritmy mul'tiagentnogo upravleniya robototekhnicheskoy sistemoy. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Priborostroenie*. 2012. N. 6. P. 93–105.

4. **Code Connected — ZeroMQ**. URL: <http://zeromq.org> (date of access 10.04.2014).
5. **Vvedenie** v sistemu obmena soobshcheniyami ZeroMQ. URL: <http://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=27137> (date of access 10.04.2014).
6. **Tanaev A.** Programirovanie socketov. URL <http://wist.ifmo.ru/info/index.html> (date of access 21.04.2014).

**С. Л. Зенкевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., zenkev@bmstu.ru,  
**Е. И. Болотин**, аспирант, eugenebolotin@maik.com,  
 Научно-учебный центр "Робототехника", МГТУ им. Н. Э. Баумана

## О планировании в мультиагентных системах, использующих методы искусственного интеллекта

*Рассмотрена задача планирования действий агентов в мультиагентных системах, которая состоит в поиске алгоритмов достижения различных целей, поступающих на вход мультиагентной системы. Цели не известны на этапе проектирования системы. Полученное решение определяет структуру действий каждого из агентов системы. Рассмотрены два типа планирования: централизованное и распределенное. Предложен комбинированный подход к решению задачи планирования, использующий метод резолюций, а также прямой вывод. Проведено математическое моделирование предложенного подхода.*

**Ключевые слова:** мультиагентные системы, планирование, метод резолюций, прямой вывод

### Введение

В настоящее время все большее внимание исследователей привлекают кооперативные интеллектуальные робототехнические системы. Эти системы состоят из групп автономных роботов, решающих задачи, в которых участие человека затруднено или невозможно [1]. С использованием кооперации роботы достигают целей, недоступных каждому из них по отдельности.

Интеллектуальность робота может быть обеспечена различными средствами, позволяющими роботу анализировать состояние окружающей среды и планировать свои действия. Один из подходов к реализации интеллектуальности робота основан на теории игр [2]. Также находят применение методы, использующие нейронные сети. Например, в работе [3] рассмотрено управление группой роботов-футболистов на основе нейросетей. Поле делится на три зоны, и в зависимости от положения мяча применяются различные нейронные сети, обученные разным стратегиям игры. Также достаточное распространение в робототехнике получили методы искусственного интеллекта и автоматического доказательства теорем. Одним из наиболее развитых языков автоматического доказательства теорем является язык Пролог, который также находит свое применение в робототехнических системах [4, 5].

Существуют два основных подхода к планированию действий распределенной робототехнической системы. Первый подход предполагает централизованное решение задачи одним из агентов и распространение этого решения к другим агентам. Второй подход предполагает независимое планирование действий агентов и их кооперацию в целях достижения общих целей. Одним из таких подходов является роевой интеллект. В данном случае сами агенты достаточно просты, однако в процессе взаимодействия они образуют интеллектуальный рой. Так, в работе [6] рассмотрена задача конструирования различных структур из блоков группой агентов-роботов. Планирование осуществляется с использованием роевых алгоритмов. В работе [7] роевой подход

применяется к задаче транспортировки сложных объектов группой простых роботов. Еще одним примером роевых алгоритмов является так называемый пчелиный алгоритм, предложенный в работах [8, 9]. Данный алгоритм также является вероятностным и позволяет эффективно решать задачи поиска глобальных экстремумов сложных многомерных функций. Агенты-пчелы исследуют пространство, концентрируясь в местах предыдущих оптимальных оценок, раз за разом улучшая фитнес-функцию популяции.

В мультиагентных системах также возникает задача кластеризации [10]. Ставится вопрос об оптимизации нагрузки на каналы связи между роботами, передачи управляющих команд и обмена информацией. Однако эти вопросы выходят за рамки данной статьи.

В данной работе предлагается подход к планированию действий мультиагентной робототехнической системы, в которой каждый из агентов имеет собственную цель, являющуюся частью общей цели системы. Неизменяемой частью системы является набор возможностей каждого из агентов. На вход мультиагентной системы поступают различные, не известные при проектировании системы цели. В процессе планирования для заданной цели определяются последовательности действий для каждого из агентов. Планирование действий может осуществляться централизованно либо распределенно. Агенты являются независимыми, каждый из них осуществляет решение задачи с использованием метода резолюций, а также прямого вывода. Также агенты осуществляют взаимодействие, обмениваясь подцелями, вызвавшими затруднения у одного из агентов.

### Централизованное планирование действий с использованием метода резолюций

Рассмотрим мультиагентную систему, состоящую из группы автономных агентов, решающих общую задачу. Каждый из агентов может выполнять определенный фиксированный набор действий. Возможности всей системы определяются составом участни-

ков. На вход мультиагентной системе могут поступать цели. В процессе планирования для заданной цели определяются последовательности действий для каждого из агентов. Планирование действий может осуществляться централизованно либо распределенно.

Для начала рассмотрим централизованное решение задачи планирования, в котором предполагается наличие единой точки принятия решений, обладающей всей информацией о системе.

Пусть у нас есть  $N$  агентов —  $agent_1, \dots, agent_N$ . Представим базу знаний в виде фактов и правил логики предикатов. Факты для агента  $agent_1$ :

$$F_i^1(agent_1, \dots, s_0), i = 1, \dots, L_1,$$

где  $i$  — индекс факта агента;  $N$  — общее число агентов;  $L_1$  — число фактов агента  $agent_1$ ;  $s_0$  — начальное состояние системы.

Факты для агента  $agent_2$ :

$$F_i^2(agent_2, \dots, s_0), i = 1, \dots, L_2,$$

где  $L_2$  — число фактов агента  $agent_2$ .

Аналогичным образом формулируются факты, связанные с остальными агентами системы:

$$F_i^j(agent_j, \dots, s_0), j = 1, \dots, N, i = 1, \dots, L_j,$$

где  $j$  — индекс агента;  $N$  — общее число агентов;  $L_j$  — число фактов агента  $agent_j$ .

Сформулируем правила логики предикатов в импликативной форме:

$$\begin{aligned} & (\bigwedge_{i_1} F_{i_1}^1(agent_1, \dots, s)) \wedge (\bigwedge_{k_1} F_{k_1}^2(agent_2, \dots, s)) \rightarrow \\ & \rightarrow (\bigwedge_{m_1} (F_{m_1}^j(agent_j, \dots, \phi_1(\dots, s)))); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\bigwedge_{i_2} F_{i_2}^1(agent_1, \dots, s)) \wedge (\bigwedge_{k_2} F_{k_2}^2(agent_2, \dots, s)) \rightarrow \\ & \rightarrow (\bigwedge_{m_2} (F_{m_2}^j(agent_j, \dots, \phi_2(\dots, s)))); \end{aligned}$$

где  $\phi_i(\dots, s)$  — это сколемовская или операторная функция, определяющая изменение состояния;  $s$  — состояние системы.

Выражения до знака импликации определяют условия выполнения какого-либо действия, предикаты после знака импликации описывают следствие изменения объектов в процессе выполненного действия. Сформулируем цель в виде конъюнкции фактов, связанных с некоторыми из агентов:

$$\begin{aligned} & F_{m_1}^{j_1}(agent_{j_1}, \dots, s) \wedge F_{m_2}^{j_2}(agent_{j_2}, \dots, s) \wedge \\ & \wedge F_{m_3}^{j_3}(agent_{j_3}, \dots, s) \wedge \dots, \end{aligned}$$

где  $j_1, j_2, j_3$  — индексы заданных агентов;  $m_1, m_2, m_3$  — индексы одного из предикатов каждого из выбранных агентов соответственно.

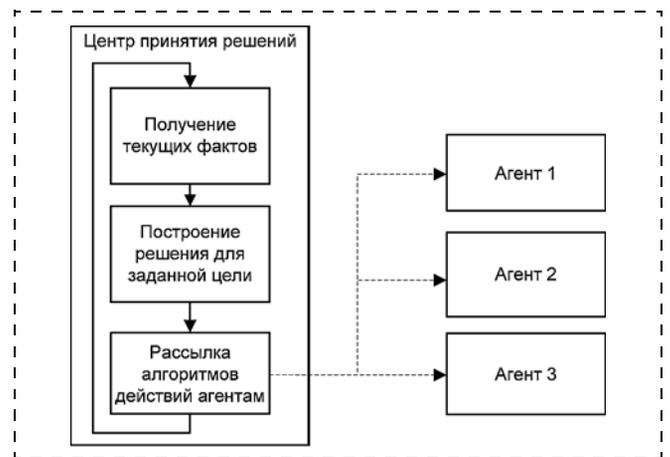


Рис. 1. Схема функционирования мультиагентной системы при централизованном планировании

Поиск решения методом резолюций состоит в формулировании цели в виде не-теоремы и построении дерева опровержения данной не-теоремы с использованием фактов. Опровержение не-теоремы и получение в результате пустого дизъюнкта доказывает достижимость цели. В процессе решения задачи мы получаем результат следующего вида, представляющий собой план действий агентов:

$$s = \phi_{i_1}(\dots, \phi_{i_2}(\dots, \phi_{i_3}(\dots, s_0))),$$

где  $i_1, i_2, i_3, \dots$  — некоторые индексы правил, которые использовались в процессе резолюции.

После того как решение найдено, планировщик из общего плана строит планы действий каждого из агентов. Общая схема функционирования мультиагентной системы приведена на рис. 1.

В предлагаемой схеме агенты являются лишь исполнителями заданий, сформулированных планировщиком. Удобство централизованного подхода состоит в том, что единый центр принятия решений обладает максимальным объемом доступной информации о мультиагентной системе. Это упрощает построение решения. Однако единый центр принятия решений уязвим, его выход из строя делает невозможной дальнейшую работу системы. Создание такой единой точки проблематично и может быть связано с ограничениями, накладываемыми каналами связи, сложностью построения единого решения для большой группы автономных мобильных роботов. Преодолеть описанные выше ограничения позволяет распределенный подход к планированию действий агентов.

### Распределенное планирование действий агентов

Предлагаемый в данной работе подход состоит в декомпозиции общей цели мультиагентной системы на ряд отдельных целей для каждого из агентов.

Для агента  $agent_1$ :

$$F_1^1(agent_1, \dots, s) \wedge F_2^1(agent_1, \dots, s) \dots$$

Для агента  $agent_j$ :

$$F_1^j(agent_j, \dots, s) \wedge F_2^j(agent_j, \dots, s) \wedge \dots$$

Агенты обладают собственными базами знаний и фактов:

$$F_1^j(agent_j, \dots, s_0), F_2^j(agent_j, \dots, s_0), \\ F_3^j(agent_j, \dots, s_0), \dots,$$

а также собственными возможными действиями, задаваемыми в виде правил:

$$\wedge_i F_i^j(agent_j, \dots, s) \rightarrow \wedge_s (F_s^j(agent_j, \dots, \phi(\dots, s)))$$

Каждый из агентов осуществляет независимый поиск решения, позволяющего ему достичь заданной цели. В случае, если агенту не удастся построить полное решение задачи, осуществляется построение и исполнение частичного решения с использованием метода прямого вывода.

После выполнения частичного решения определяются правила текущего агента, в которых условия для данного агента выполнены, а внешние условия не выполнены. Внешними называются условия, не зависящие от текущего агента. Например, для агента  $agent_j$ :

$$\underline{F_1^j(agent_j, s)} \wedge \underline{F_1^k(agent_k, s)} \wedge F_2^k(agent_k, s) \wedge \\ \wedge F^f(agent_f, s) \rightarrow F_2^j(agent_j, \phi(s)),$$

где  $j, f, k$  — некоторые индексы агентов.

В данном выражении подчеркнуты выполненные условия. Из них одно внутреннее условие —  $F_1^j(agent_j, s)$  и одно внешнее —  $F_1^k(agent_k, s)$ . Не выполненные внешние условия  $F_2^k(agent_k, s)$  и  $F^f(agent_f, s)$  рассылаются в виде целей другим агентам системы.

Каждый из агентов при получении подобного запроса пытается построить решение для достижения пришедшей цели. Если решение найдено, агент отправляет ответ о готовности выполнения для достижения заданной цели. Исходный агент аккумулирует ответы, полученные от других агентов. Далее он выбирает группу агентов, позволяющих ему продвинуться в решении задачи, и отправляет им сигнал о начале исполнения решения. Алгоритм выбора зависит от конкретной задачи.

Схема работы мультиагентной системы представлена на рис. 2.

### Пример. Задача о сборке узлов из деталей роботами-манипуляторами. Централизованное решение

Рассмотрим решение задачи о сборке узлов из деталей (рис. 3).

Сборка узлов осуществляется роботами  $robot_1$  и  $robot_2$ . Узлы состоят из деталей типов 1 и 2. Детали подаются по конвейерам  $transporter_1$ ,  $transporter_2$  и  $transporter_3$ . Каждый из роботов с помощью манипулятора перемещает детали на сборочную позицию, на которой затем соединяются детали в узел. Сформулируем правила и факты задачи в терминах логики предикатов. Для описания фактов и правил будем использовать нотацию языка Пролог. Названия предикатов и переменных начинаются с прописной буквы, названия констант написаны строчными буквами. Опишем исходное состояние (факты):

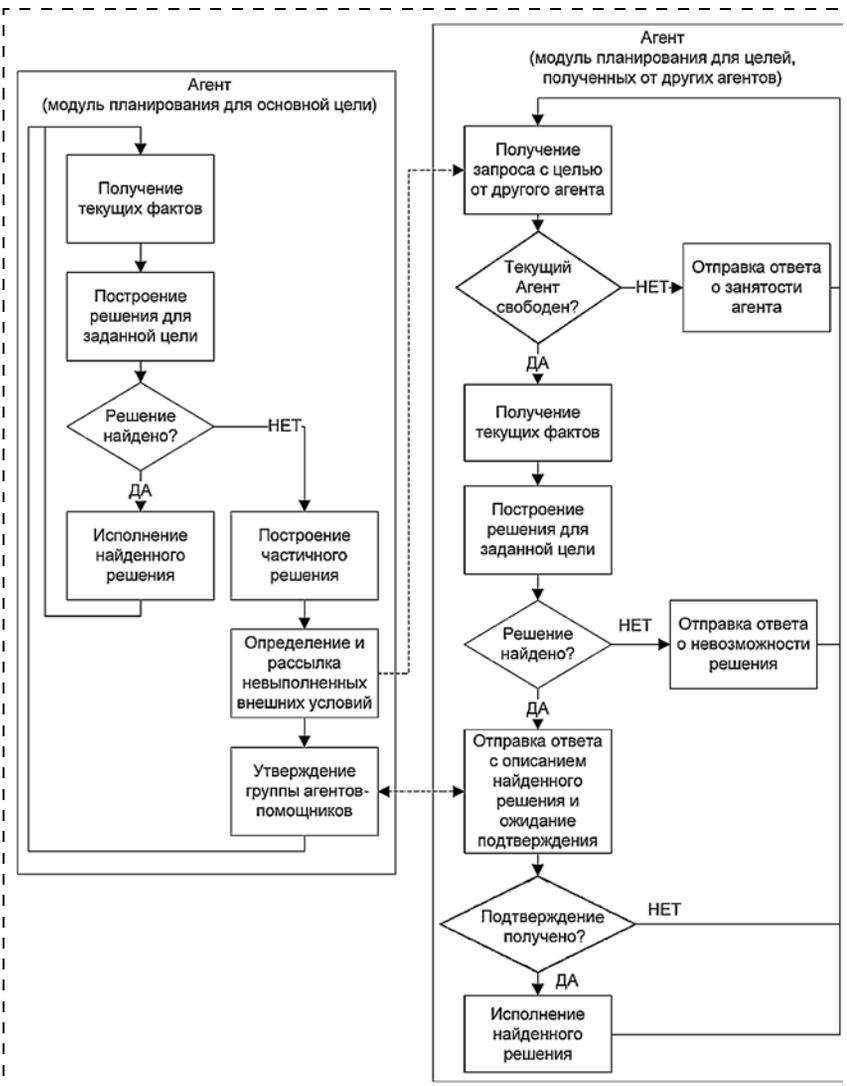


Рис. 2. Схема функционирования мультиагентной системы при распределенном планировании

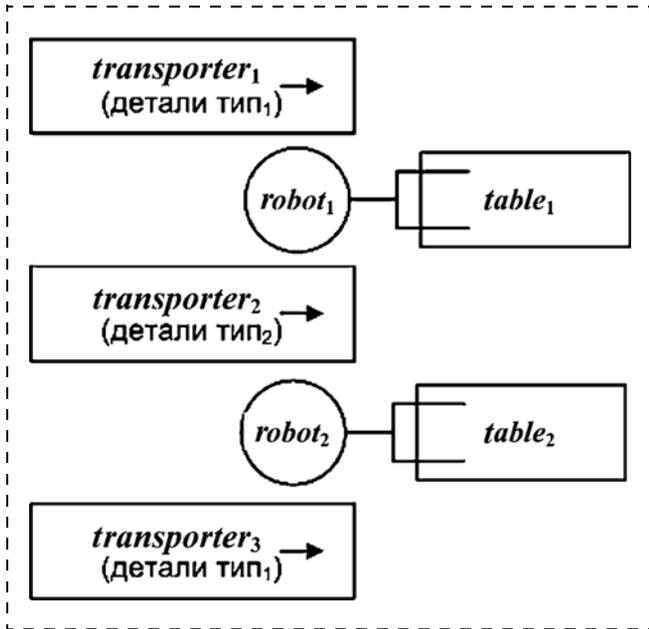


Рис. 3. Задача о сборке узлов из деталей

- Предикат  $Pos$  описывает положение схвата манипулятора.

Схват манипулятора  $robot_1$  находится над сборочной позицией  $table_1$ :

$$Pos(robot_1, table_1, s_0).$$

Схват манипулятора  $robot_1$  находится над сборочной позицией  $table_2$ :

$$Pos(robot_2, table_2, s_0).$$

- Предикат  $Part$  описывает наличие деталей типов 1 и 2 в схвате манипулятора одного из роботов, на конвейере или сборочной позиции.

В схвате манипулятора  $robot_1$  отсутствуют детали типов 1 и 2:

$$Part(robot_1, hasnot, hasnot, s_0).$$

В схвате манипулятора  $robot_2$  отсутствуют детали типов 1 и 2:

$$Part(robot_2, hasnot, hasnot, s_0).$$

На конвейере  $transporter_1$  отсутствует деталь типа 1:

$$Part(transporter_1, hasnot, s_0).$$

На конвейере  $transporter_2$  отсутствует деталь типа 2:

$$Part(transporter_2, hasnot, s_0).$$

На сборочной позиции  $table_1$  отсутствуют детали типов 1 и 2:

$$Part(table_1, hasnot, hasnot, s_0).$$

На сборочной позиции  $table_2$  отсутствуют детали типов 1 и 2:

$$Part(table_2, hasnot, hasnot, s_0).$$

- Предикат  $Unit(T, s)$  описывает наличие на сборочной позиции  $T$  собранного узла.

Приведем теперь некоторые правила системы. Остальные правила формулируются по аналогии с приведенными ниже.

Перемещение схвата манипулятора робота:

$$Pos(robot_1, X, s) \rightarrow Pos(robot_1, Move(X_1, s)),$$

где  $Move(X_1, s)$  — сколемовская функция, описывающая изменение состояния системы при перемещении схвата манипулятора в положение  $X_1$ .

Перемещение ленты конвейера с деталью:

$$Part(transporter_1, hasnot, s) \rightarrow Part(transporter_1, has, Shift(T_1, s)),$$

где  $Shift(T_1, s)$  — сколемовская функция, описывающая изменение состояния системы при перемещении ленты конвейера  $T_1$ .

Захват детали роботом с конвейера:

$$Pos(robot_1, transporter_1, s) \wedge Part(robot_1, hasnot, hasnot, s) \wedge Part(transporter_1, has, s) \rightarrow Part(robot_1, haspart_1, hasnot, Take(robot_1, transporter_1, s)) \wedge Part(transporter_1, hasnot, Take(robot_1, transporter_1, s)),$$

где  $Take(R, T, s)$  — сколемовская функция, описывающая изменение состояния системы при захвате манипулятором робота  $R$  детали с конвейера  $T$ .

Помещение детали из схвата манипулятора на сборочную позицию:

$$Pos(robot_1, table_1, s) \wedge Part(robot_1, haspart_1, hasnot, s) \wedge Part(table_1, part_1, part_2, s) \rightarrow Part(robot_1, hasnot, Release(robot_1, s)) \wedge Part(table_1, haspart_1, part_2, Release(robot_1, s)),$$

где  $Release(R, s)$  — сколемовская функция, описывающая изменение состояния системы при помещении детали из схвата манипулятора робота  $R$  на сборочную позицию.

Сборка манипулятором узла из деталей на сборочной позиции:

$$Pos(robot_1, table_1, s) \wedge Part(robot_1, hasnot, hasnot, s) \wedge Part(table_1, haspart_1, haspart_2, s) \rightarrow Part(table_1, hasnot, hasnot, Build(robot_1, s)) \wedge Unit(table_1, Build(robot_1, s)),$$

где  $Build(R, s)$  — сколемовская функция, описывающая изменение состояния системы при сборке узла из деталей роботом  $R$  на сборочной позиции.

Цель формулируется следующим образом:

$$Unit(table_1, s) \wedge Unit(table_2, s).$$

В процессе поиска решений получаем следующий результат:

$$s = \text{Build}(r_2, \\ \text{Release}(r_2, \text{Move}(r_2, \text{table}_2, \text{Take}(r_2, t_2, \text{Shift}(t_2, \text{Move}(r_1, t_2, \\ \text{Release}(r_2, \text{Move}(r_2, \text{table}_2, \text{Take}(r_2, t_3, \text{Shift}(t_3, \text{Move}(r_2, t_3, \\ \text{Build}(r_1, \\ \text{Release}(r_1, \text{Move}(r_1, \text{table}_1, \text{Take}(r_1, t_2, \text{Shift}(t_2, \text{Move}(r_1, t_2, \\ \text{Release}(r_1, \text{Move}(r_1, \text{table}_1, \text{Take}(r_1, t_1, \text{Shift}(t_1, \\ \text{Move}(r_1, t_1, S_0) \dots),$$

где  $r_1, r_2$  — сокращения от  $robot_1, robot_2$  соответственно;  $t_1, t_2$  — сокращения от  $transporter_1, transporter_2$  соответственно.

Полученное выше решение может быть использовано для формирования алгоритмов действий каждого из агентов. Как описывалось выше, централизованный подход обладает рядом ограничений. Рассмотрим теперь мультиагентный вариант планирования в задаче о сборке узлов.

### Мультиагентный вариант задачи о сборке узлов

В данном подходе общая цель декомпозируется в отдельные цели агентов. Агентам-манипуляторам ставятся цели, соответственно,  $\text{Unit}(\text{table}_1, s)$  и  $\text{Unit}(\text{table}_2, s)$ .

Каждый из агентов пытается построить решение для достижения своей цели. Рассмотрим работу агента  $robot_1$ . Построить полное решение ему не удастся. В процессе прямого вывода он может применить лишь одно правило, осуществив перемещение манипулятора к одному из конвейеров:

$$\text{Pos}(robot_1, X, s) \rightarrow \text{Pos}(robot_1, \text{Move}(X_1, s)).$$

Далее определяются правила, для которых условия для данного агента выполнены, а внешние условия не выполнены. В данном случае это одно правило:

$$\text{Pos}(robot_1, transporter_1, s) \wedge \\ \wedge \text{Part}(robot_1, \text{hasnot}, \text{hasnot}, s) \wedge \\ \wedge \text{Part}(transporter_1, \text{has}, s) \rightarrow \\ \rightarrow \text{Part}(robot_1, \text{haspart}_1, \text{hasnot}, \\ \text{Take}(robot_1, transporter_1, s)) \wedge \\ \wedge \text{Part}(transporter_1, \text{hasnot}, \text{Take}(robot_1, transporter_1, s)).$$

Внешним невыполненным условием в данном случае является условие

$$\text{Part}(transporter_1, \text{has}, s).$$

Данное условие отправляется другим агентам системы.  $transporter_1$  успешно строит решение для присланной цели и отправляет агенту  $robot_1$  положительный ответ. Далее робот принимает помощь от агента  $transporter_1$ . После этого  $robot_1$  снова пытается построить полное решение по исходной цели. Решение найти не удастся, и агент переключается в режим прямого вывода, в процессе которого применяет правила:

- для захвата детали с  $transporter_1$ :
 
$$\text{Pos}(robot_1, transporter_1, s) \wedge \\ \wedge \text{Part}(robot_1, \text{hasnot}, \text{hasnot}, s) \wedge \\ \wedge \text{Part}(transporter_1, \text{has}, s) \rightarrow \\ \rightarrow \text{Part}(robot_1, \text{haspart}_1, \text{hasnot}, \\ \text{Take}(robot_1, transporter_1, s)) \wedge \\ \wedge \text{Part}(transporter_1, \text{hasnot}, \text{Take}(robot_1, transporter_1, s));$$

- для перемещения схвата манипулятора к сборочной позиции

$$\text{Pos}(robot_1, X, s) \rightarrow \text{Pos}(robot_1, \text{Move}(X_1, s));$$

- для помещения детали из схвата на сборочную позицию

$$\text{Pos}(robot_1, table_1, s) \wedge \\ \wedge \text{Part}(robot_1, \text{haspart}_1, \text{hasnot}, s) \wedge \\ \wedge \text{Part}(table_1, \text{part}_1, \text{part}_2, s) \rightarrow \\ \rightarrow \text{Part}(robot_1, \text{hasnot}, \text{Release}(robot_1, s)) \wedge \\ \wedge \text{Part}(table_1, \text{haspart}_1, \text{part}_2, \text{Release}(robot_1, s));$$

- для перемещения схвата к  $transporter_1$ :

$$\text{Pos}(robot_1, X, s) \rightarrow \text{Pos}(robot_1, \text{Move}(X_1, s)).$$

Далее повторяется сценарий запроса помощи агентов с целью:

$$\text{Part}(transporter_2, \text{has}, s).$$

Агент  $transporter_2$  строит решение для описанной выше цели и помогает в решении агенту  $robot_1$ . Далее агент  $robot_1$  может построить решение для заданной ему цели и получить результат:

$$s = \text{Build}(robot_1, \text{Release}(robot_1, \text{Move}(robot_1, \text{table}_1, \\ \text{Take}(robot_1, transporter_2, s_0))))).$$

Аналогичная схема работы используется для агента  $robot_2$ .

### Изменение условий задачи в процессе работы мультиагентной системы

Рассмотрим ситуацию, когда в процессе работы системы условия задачи меняются. Например, вместо робота  $robot_1$  устанавливается робот  $robot_3$ , которому для сборки узла требуется одна деталь типа 1 и ни одной типа 2. Правила данного робота повторяют правила робота  $robot_1$ , за исключением правила сборки узла из деталей на сборочной позиции:

$$\text{Pos}(robot_1, table_1, s) \wedge \\ \wedge \text{Part}(robot_1, \text{hasnot}, \text{hasnot}, s) \wedge \\ \wedge \text{Part}(table_1, \text{haspart}_1, \text{hasnot}, s) \rightarrow \\ \rightarrow \text{Part}(table_1, \text{hasnot}, \text{hasnot}, \text{Build}(robot_1, s)) \wedge \\ \wedge \text{Unit}(table_1, \text{Build}(robot_1, s)).$$

Цель агента  $robot_3$  формулируется так же, как и для агента  $robot_1$ :

$$\text{Unit}(table_1, s).$$

В данном случае структура решения сократится до следующих шагов:

1. Прямой вывод. Перемещение схвата к конвейеру  $transporter_1$ :

$$Pos(robot_3, X, s) \rightarrow Pos(robot_3, Move(X_1, s)).$$

2. Запрос о помощи с невыполненным внешним условием:

$$Part(transporter_1, has, s).$$

3. Помощь в решении агентом  $transporter_1$ .

4. Далее возможно построение полного решения для заданной цели.

5. Итоговое решение имеет вид:

$$s = Build(robot_3, Release(robot_3, Move(robot_3, table_1, Take(robot_3, table_1, Shift(table_1, Move(robot_3, table_1, s_0)))))).$$

### Заключение

В данной работе был предложен распределенный алгоритм планирования действий в мультиагентных системах. Данный алгоритм позволяет осуществлять достижение произвольных, не известных при проектировании системы целей, заданных в форме фактов логики предикатов. В представленном распределенном подходе агенты кооперируются друг с другом для достижения поставленной перед каждым из них задачи. В данном подходе отсутствует централизация, что позволяет избежать возникновения единой точки отказа системы. Мультиагентная система может модифицироваться в процессе работы, может меняться состав агентов, добавляться агенты с новыми возможностями, и данные агенты будут задействованы в решении поставленных перед системой задач. Также было проведено математическое моделирование предложенного алгоритма планирования на примере задачи

о сборке узлов роботами, оснащенными манипуляторами. Полученный результат показал применимость алгоритма для реальных производственных задач.

Дальнейшая работа состоит в разработке алгоритмов исполнительской части системы. Эти алгоритмы позволят формировать управление агентами системы по найденным на этапе планирования решениям. Далее предполагается создание прототипа мультиагентной системы, осуществляющей планирование по предложенному в данной работе алгоритму.

### Список литературы

1. Назарова А. В., Рыжова Т. П. Методы и алгоритмы мультиагентного управления робототехнической системой // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. № 6. С. 93–105.
2. LaValle S. M. Robot motion planning: A game-theoretic foundation // Algorithmica. 2000. N. 26 (3). P. 430–465.
3. Jolly K. G., Ravindran K. P., Vijayakumar R., Sreerama R. Kumar. Intelligent decision making in multi-agent robot soccer system through compounded artificial neural networks // Robotics and Autonomous Systems. 2007. N. 55 (7). P. 589–596.
4. Pozos P., Yescas E., Vásquez J. Planning using situation calculus, prolog and a mobile robot // Proc. of Third Latin-American Workshop on Non-Monotonic Reasoning (LANMR07). Puebla, Mexico, 2007.
5. Design an Arm Robot through Prolog Programming Language // Adv Robot Autom. 2013. V. 2. P. 104.
6. Werfel J., Petersen K., Nagpal R. Designing collective behavior in a termite-inspired robot construction team // Science. 2014. N. 343 (6172). P. 754–758.
7. Rubenstein M., Cabrera A., Werfel J., Habibi G., McLurkin J., Nagpal R. Collective transport of complex objects by simple robots: theory and experiments // AAMAS. 2013. P. 47–54.
8. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical report — TR06. Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. 2005.
9. Pham D. T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otri S., Rahim S., Zaidi M. The Bees Algorithm. Technical Note. Manufacturing Engineering Centre. Cardiff University, UK, 2005.
10. Зенкевич С. Л., Болотин Е. И. Задача кластеризации распределенных систем на примере групповой кооперации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 8. С. 28–33.

S. L. Zenkevich, Professor, zenkev@bmstu.ru,

E. I. Bolotin, Postgraduate student, eugenebolotin@gmail.com,

Center of Education and Research "Robotics", Bauman Moscow State Technical University

## Planning in Multiagent Systems that Use Artificial Intelligence Methods

*In this paper we examine the problem of planning in multi-agent systems. The essence of the problem is to find an algorithm for such multi-agent system that can achieve a variety of given objectives. These objectives are dynamic in nature and not determined at the system's design stage. A resulting solution should represent an action scheme for each agent in the system. There are two types of planning — centralised and distributed, as well as there are two types of methods that can solve the problem — resolution and direct inference. We propose a new combined distributed approach that utilises both the resolution and direct inference method. To set a goal for each agent we decompose a given common goal of the multi-agent system. Each agent has its own knowledge base and fact library. Each of the agents tries to search for an independent global solution by using the resolution method. If full global solution is not found the agent starts searching for partial solutions. The important property of multi-agent systems is that agents can and should collaborate with each other during their search for the solutions. This paper contains all necessary mathematical models that were developed as the result of this research.*

**Keywords:** multiagent systems, planning, resolution method, direct inference

## References

1. **Nazarova A. V., Ryzhova T. P.** Metody i algoritmy mul'ti-agentnogo upravleniya robototekhnicheskoy sistemoy. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Priborostroenie*. 2012. N. 6. P. 93–105.
2. **LaValle S. M.** Robot motion planning: A game-theoretic foundation. *Algorithmica*. 2000. V. 26 (3). P. 430–465.
3. **Jolly K. G., Ravindran K. P., Vijayakumar R., Sreerama R. Kumar.** Intelligent decision making in multi-agent robot soccer system through compounded artificial neural networks. *Robotics and Autonomous Systems*. 2007. V. 55 (7). P. 589–596.
4. **Pozos P., Yescas E., Vázquez J.** Planning using situation calculus, prolog and a mobile robot. In Proc. of Third Latin-American Workshop on Non-Monotonic Reasoning (LANMR07). Puebla, Mexico, 2007.
5. **Design** an Arm Robot through Prolog Programming Language. *Adv Robot Autom*. 2013. V. 2. P. 104.

6. **Designing** collective behavior in a termite-inspired robot construction team. Justin Werfel, Kirstin Petersen, and Radhika Nagpal. *Science*. 2014. N. 343 (6172). P. 754–758.
7. **Rubenstein M., Cabrera A., Werfel J., Habibi G., McLurkin J., Nagpal R.** Collective transport of complex objects by simple robots: theory and experiments. *AAMAS*. 2013. P. 47–54.
8. **Karaboga D.** An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical report — TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. 2005.
9. **Pham D. T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otri S., Rahim S., Zaidi M.** The Bees Algorithm. Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK, 2005.
10. **Zenkevich S. L., Bolotin E. I.** Zadacha klasterizatsii raspredelennykh sistem na primere gruppovoy kooperatsii. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2013. N. 8. P. 28–33.

УДК 004.896; 535.8

**Б. Б. Михайлов**, канд. техн. наук, доц., robot@bmstu.ru, **А. В. Нгуен**, аспирант, vantbtv@mail.ru, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

## Использование характеристических точек для распознавания 3D-объектов

*Рассмотрен способ построения геометрических связей характеристических точек объектов, ограниченных плоскостями. Предложен метод распознавания таких 3D-объектов с использованием процедуры сравнения пространственного расположения характеристических точек реального объекта и его модели.*

**Ключевые слова:** рабочее пространство робота, характеристические точки объекта, 3D-система технического зрения, распознавание пространственных объектов

### Введение

Сегодня в процессе активного развития технологий в мире возникают проблемы создания роботов для замены человека в экстремальных и опасных для жизни условиях. Для автономного решения задач управления движением и манипулирования объектами роботы должны распознавать окружающую среду. В данной работе рассматривается алгоритм распознавания рабочей сцены, основанный на анализе пространственного расположения характеристических точек объектов.

### 1. Характеристические точки и их параметры

Характеристическими точками будем считать точки пересечения трех плоскостей одного объекта, при этом каждая точка имеет свои параметры [1, 2]. Например, на модели параллелепипеда (рис. 1) показано взаимное расположение восьми характеристических точек в пространстве ( $B_1 \dots B_8$ ).

Каждая характеристическая точка модели, например  $B_1$ , имеет 12 параметров, которые ниже разделены на четыре группы (рис. 2, а):

- три угла:  $\alpha_{12}^{B_1}$  — угол между прямыми  $d_{13}^{B_1}$  и  $d_{23}^{B_1}$ ;
- $\alpha_{23}^{B_1}$  — угол между прямыми  $d_{12}^{B_1}$  и  $d_{13}^{B_1}$ ;  $\alpha_{13}^{B_1}$  —
- угол между прямыми  $d_{12}^{B_1}$  и  $d_{23}^{B_1}$ ;

- три линии (ребра) пересечения двух плоскостей:  $d_{12}^{B_1}$  — линия пересечения  $M_1^{B_1}$  и  $M_2^{B_1}$ ;  $d_{23}^{B_1}$  — линия пересечения  $M_2^{B_1}$  и  $M_3^{B_1}$ ;  $d_{13}^{B_1}$  — линия пересечения  $M_1^{B_1}$  и  $M_3^{B_1}$ ;

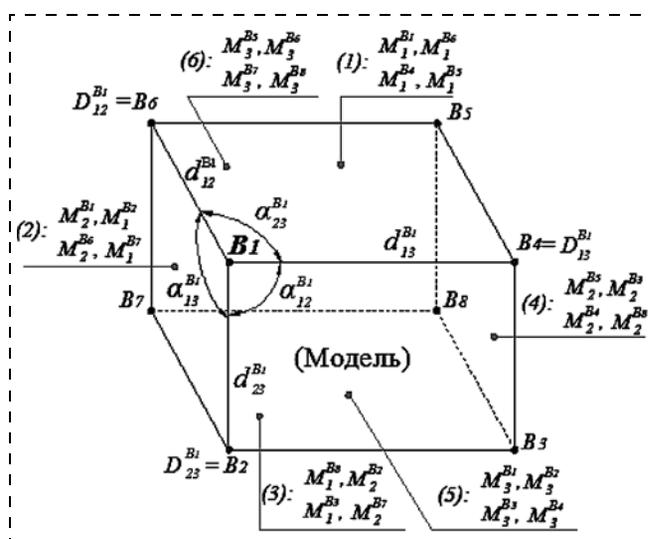


Рис. 1. Модель параллелепипеда и его характеристические точки



Рис. 2. Группы параметров характеристических точек

- три точки, с которыми соединяется точка  $B_1$ :  
 $D_{12}^{B_1} = B_6$  — по линии  $d_{12}^{B_1}$ ;  $D_{23}^{B_1} = B_2$  — по линии  $d_{23}^{B_1}$ ;  
 $D_{13}^{B_1} = B_4$  — по линии  $d_{13}^{B_1}$ ;
- три грани:  $M_1^{B_1}$ ;  $M_2^{B_1}$ ;  $M_3^{B_1}$ , на пересечении которых находится точка  $B_1$ .

Используя 3D-систему технического зрения, мы получаем аналогичное описание реальных объектов в виде набора характеристических точек и их параметров [2, 3]. Дополнительно описание содержит пространственные координаты точки. Например, для точки  $A$  одного объекта оно имеет вид, показанный на рис. 2, б.

## 2. Алгоритм распознавания

Предлагаемый алгоритм распознавания основан на сравнении пространственного расположения характеристических точек реального объекта и его модели. Сравнивая значения углов, находим начальную точку  $A$  на изображении объекта, которая совпадает с точкой  $B$  модели. Если точка  $A$  существует, тогда последовательно определяем все характеристические точки, которые связаны с точкой  $A$  этого объекта, и сравниваем их с соответствующими точками модели. Если они совпадают по

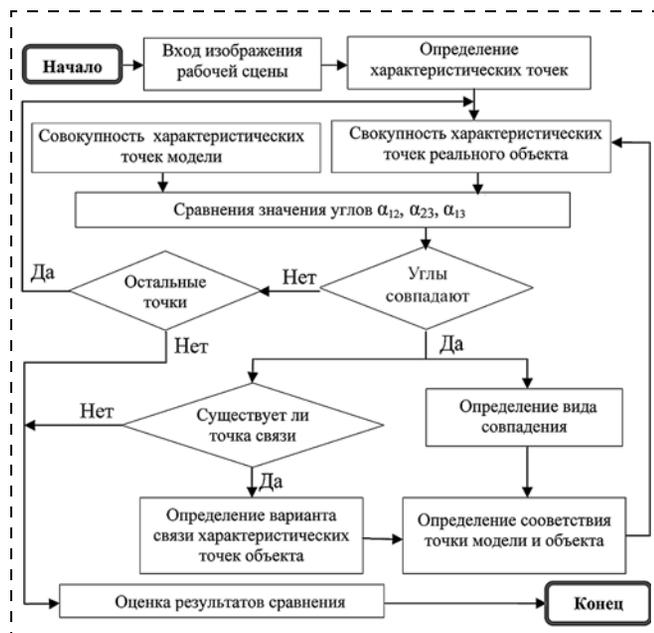


Рис. 3. Общий алгоритм распознавания

условию углов, то проверяем расстояния между характеристическими точками объекта и модели [4]. На основании полученных результатов делаем вывод о совпадении и рассчитываем степень похожести. Общий алгоритм распознавания показан на рис. 3.

Рассмотрим процедуру сравнения углов  $\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{13}$  объекта и модели. Пусть характеристические точки  $A$  и  $B$  объекта и модели имеют параметры, показанные на рис. 2. Поскольку параметры группы углов точки  $A$  реального объекта и точки  $B$  модели имеют три значения, то при сравнении этих точек необходимо проанализировать шесть возможных видов совпадения:

$$\begin{aligned} \text{вид 1: } & \begin{cases} \alpha_{12}^A = \alpha_{12}^B; \\ \alpha_{23}^A = \alpha_{23}^B; \\ \alpha_{13}^A = \alpha_{13}^B; \end{cases} & \text{вид 2: } & \begin{cases} \alpha_{12}^A = \alpha_{12}^B; \\ \alpha_{23}^A = \alpha_{13}^B; \\ \alpha_{13}^A = \alpha_{23}^B; \end{cases} \\ \text{вид 3: } & \begin{cases} \alpha_{12}^A = \alpha_{23}^B; \\ \alpha_{23}^A = \alpha_{13}^B; \\ \alpha_{13}^A = \alpha_{12}^B; \end{cases} & \text{вид 4: } & \begin{cases} \alpha_{12}^A = \alpha_{23}^B; \\ \alpha_{23}^A = \alpha_{12}^B; \\ \alpha_{13}^A = \alpha_{13}^B; \end{cases} \\ \text{вид 5: } & \begin{cases} \alpha_{12}^A = \alpha_{13}^B; \\ \alpha_{23}^A = \alpha_{12}^B; \\ \alpha_{13}^A = \alpha_{23}^B; \end{cases} & \text{вид 6: } & \begin{cases} \alpha_{12}^A = \alpha_{13}^B; \\ \alpha_{23}^A = \alpha_{23}^B; \\ \alpha_{13}^A = \alpha_{12}^B; \end{cases} \end{aligned}$$

Иллюстрация второго вида совпадения показана на рис. 4.

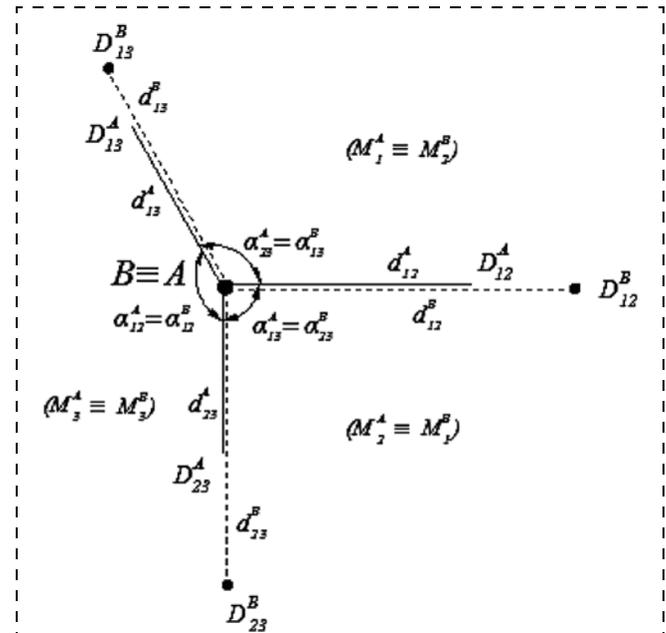


Рис. 4. Второй вид совпадения точек  $A$  и  $B$

**Определение связей точки  $A$  с другими характеристическими точками объекта.** Очевидно, что не все характеристические точки, выделенные на реальной сцене, принадлежат одному объекту. Поэтому необходимо определить точки одного объекта и собрать их в отдельной группе. Далее анализируются варианты связи между точками одной группы. Эта информация очень важна для определения вида совпадения характеристических точек объекта с точками модели.

Для решения задачи применим следующий алгоритм: поочередно проверяем все характеристические точки, используя параметры группы граней. Если два параметра группы граней у точек совпадают, то такие точки принадлежат одному ребру и одному объекту.

Например, рассмотрим характеристическую точку  $A$  с параметрами

...	$D_{12}^A$	$D_{23}^A$	$D_{13}^A$	$M_1^A$	$M_2^A$	$M_3^A$
-----	------------	------------	------------	---------	---------	---------

и точку  $A_1$  с параметрами

...	$D_{12}^{A_1}$	$D_{23}^{A_1}$	$D_{13}^{A_1}$	$M_1^{A_1}$	$M_2^{A_1}$	$M_3^{A_1}$
-----	----------------	----------------	----------------	-------------	-------------	-------------

Если они принадлежат одному ребру, то у них две грани из трех совпадают. Поскольку мы рассматриваем трехмерный объект, то существуют 18 вариантов описания связи (отношений) между точками  $A$  и  $A_1$ :

- вариант 1:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_1^{A_1}; \\ M_2^A \equiv M_2^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{12}^A \equiv A_1; \\ D_{12}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 2:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_2^{A_1}; \\ M_2^A \equiv M_1^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{12}^A \equiv A_1; \\ D_{12}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 3:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_2^{A_1}; \\ M_2^A \equiv M_3^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{12}^A \equiv A_1; \\ D_{23}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 4:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_3^{A_1}; \\ M_2^A \equiv M_2^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{12}^A \equiv A_1; \\ D_{23}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 5:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_1^{A_1}; \\ M_2^A \equiv M_3^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{12}^A \equiv A_1; \\ D_{13}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 6:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_3^{A_1}; \\ M_2^A \equiv M_1^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{12}^A \equiv A_1; \\ D_{13}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 7:  $\begin{cases} M_2^A \equiv M_1^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_2^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{23}^A \equiv A_1; \\ D_{12}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$

- вариант 8:  $\begin{cases} M_2^A \equiv M_2^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_1^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{23}^A \equiv A_1; \\ D_{12}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 9:  $\begin{cases} M_2^A \equiv M_2^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_3^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{23}^A \equiv A_1; \\ D_{23}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 10:  $\begin{cases} M_2^A \equiv M_3^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_2^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{23}^A \equiv A_1; \\ D_{23}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 11:  $\begin{cases} M_2^A \equiv M_1^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_3^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{23}^A \equiv A_1; \\ D_{13}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 12:  $\begin{cases} M_2^A \equiv M_3^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_1^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{23}^A \equiv A_1; \\ D_{13}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 13:  $\begin{cases} M_2^A \equiv M_1^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_2^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{13}^A \equiv A_1; \\ D_{12}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 14:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_2^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_1^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{13}^A \equiv A_1; \\ D_{12}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 15:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_2^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_3^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{13}^A \equiv A_1; \\ D_{22}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 16:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_3^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_2^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{13}^A \equiv A_1; \\ D_{23}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 17:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_1^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_3^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{13}^A \equiv A_1; \\ D_{13}^{A_1} \equiv A; \end{cases}$
- вариант 18:  $\begin{cases} M_1^A \equiv M_3^{A_1}; \\ M_3^A \equiv M_1^{A_1}, \end{cases}$  тогда  $\begin{cases} D_{13}^A \equiv A_1; \\ D_{13}^{A_1} \equiv A. \end{cases}$

Графическая иллюстрация первого и второго вариантов связи между точками  $A$  и  $A_1$  показана на рис. 5.

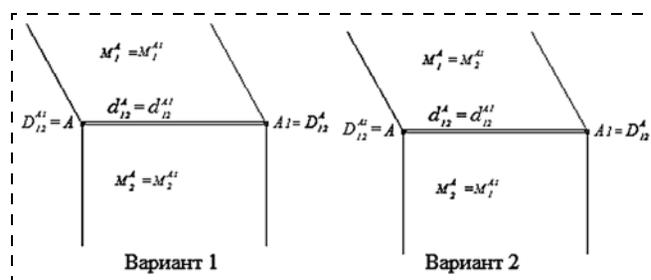


Рис. 5. Иллюстрация вариантов связи между точками  $A$  и  $A_1$

**Определение отношений характеристических точек реального объекта и модели.** После выделения характеристических точек  $A_i$  (на объекте) и  $B_j$  (на модели) необходимо определить вид совпадения. Рассмотрим случай, когда у точки  $A$  значения параметров из третьей группы (группы точек) не равны нулю, т. е. существуют точки, связанные с этой точкой, например точка  $D_{12}^A$ . Тогда необходимо определить, совпадет ли точка  $D_{12}^A$  с какой-нибудь точкой модели.

Для решения этой задачи необходимо рассмотреть шесть видов возможных совпадений и составить таблицу соответствия точек реального объекта и точек модели. Мы знаем, что если точка  $A$  совпадает с точкой  $B$  (вид совпадения 1), то точка  $D_{12}^A$  (на объекте) должна совпадать с точкой  $D_{12}^B$  (на модели). Для подтверждения этого предположения рассмотрим шесть видов совпадения характеристических точек и 18 возможных вариантов связи между ними (табл. 1).

На рис. 6 показан первый вид совпадения и все варианты связи точки  $A$  (на реальном объекте) и точки  $B$  (на модели). При этом из табл. 1 следует, что соседняя точка  $D_{12}^A$  точки  $A$  (точка  $A_1$  на рис. 6) должна совпадать с соседней точкой  $D_{12}^B$  точки  $B$  (точка  $B_1$  на рис. 6), но не известно, каков вид совпадения. Как видно на рис. 6, если имеет место вариант 1 связи между точками  $A$  и  $A_1$ , то  $M_1^A \equiv M_1^{A_1}$  и  $M_2^A \equiv M_2^{A_1}$ .

Аналогично мы можем рассмотреть все возможные случаи совпадения точек  $A_i$ , связанных с одной точкой объекта  $A$ , и точек  $B_j$ , связанных с выбранной точкой модели  $B$ . Например, в табл. 2 приве-

Параметры $A$	Виды совпадения $A$ и $B$					
	Вид 1	Вид 2	Вид 3	Вид 4	Вид 5	Вид 6
$D_{12}^A$	$D_{12}^B$	$D_{12}^B$	$D_{23}^B$	$D_{23}^B$	$D_{13}^B$	$D_{13}^B$
$D_{23}^A$	$D_{23}^B$	$D_{13}^B$	$D_{13}^B$	$D_{12}^B$	$D_{12}^B$	$D_{23}^B$
$D_{13}^A$	$D_{13}^B$	$D_{23}^B$	$D_{12}^B$	$D_{13}^B$	$D_{23}^B$	$D_{12}^B$

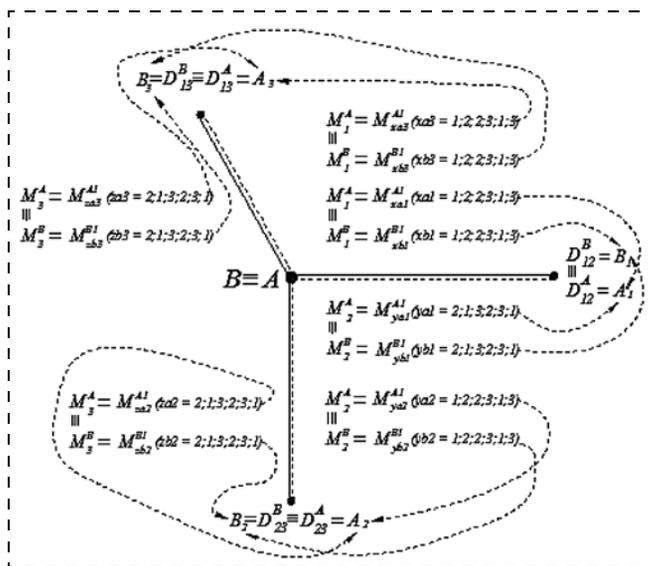


Рис. 6. Первый вид совпадения характеристических точек

дены виды совпадения характеристических точек объекта и модели в том случае, когда точка  $A$  совпадает с точкой  $B$  при совпадениях вида 1, 3 и 5, а в табл. 3 — когда точка  $A$  совпадает с точкой  $B$  при совпадениях вида 2, 4 и 6.

Варианты связи точек $B$ и $B_j$	Варианты связи точек $A$ и $A_i$																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1	2	5	4	6	3	1	2	5	4	6	3	2	1	4	5	3	6
2	2	1	4	5	3	6	2	1	4	5	3	6	1	2	5	4	6	3
3	3	4	1	6	2	5	3	4	1	6	2	5	4	3	6	1	5	2
4	4	3	6	1	5	2	4	3	6	1	5	2	3	4	1	6	2	5
5	6	5	2	3	1	4	6	5	2	3	1	4	5	6	3	2	4	1
6	5	6	3	2	4	1	5	6	3	2	4	1	5	6	2	3	1	4
7	1	2	5	4	6	3	1	2	5	4	6	3	2	1	4	5	3	6
8	2	1	4	5	3	6	2	1	4	5	3	6	1	2	5	4	6	3
9	3	4	1	6	2	5	3	4	1	6	2	5	4	3	6	1	5	2
10	4	3	6	1	5	2	4	3	6	1	5	2	3	4	1	6	2	5
11	6	5	2	3	1	4	6	5	2	3	1	4	5	6	3	2	4	1
12	5	6	3	2	4	1	5	6	3	2	4	1	5	6	2	3	1	4
13	2	1	4	5	3	6	2	1	4	5	3	6	1	2	5	4	6	3
14	1	2	5	4	6	3	1	2	5	4	6	3	2	1	4	5	3	6
15	4	3	6	1	5	2	4	3	6	1	5	2	3	4	1	6	2	5
16	3	4	1	6	2	5	3	4	1	6	2	5	4	3	6	1	5	2
17	5	6	3	2	4	1	5	6	3	2	4	1	5	6	2	3	1	4
18	6	5	2	3	1	4	6	5	2	3	1	4	5	6	3	2	4	1

Варианты связи точек $B$ и $B_j$	Варианты связи точек $A$ и $A_j$																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	1	4	5	3	6	2	1	4	5	3	6	1	2	5	4	6	3
2	1	2	5	4	6	3	1	2	5	4	6	3	2	1	4	5	3	6
3	4	3	6	1	5	2	4	3	6	1	5	2	3	4	1	6	2	5
4	3	4	1	6	2	5	3	4	1	6	2	5	4	3	6	1	5	2
5	5	6	3	2	4	1	5	6	3	2	4	1	6	5	2	3	1	4
6	6	5	2	3	1	4	6	5	2	3	1	4	5	6	3	2	4	1
7	2	1	4	5	3	6	2	1	4	5	3	6	1	2	5	4	6	3
8	1	2	5	4	6	3	1	2	5	4	6	3	2	1	4	5	3	6
9	4	3	6	1	5	2	4	3	6	1	5	2	3	4	1	6	2	5
10	3	4	1	6	2	5	3	4	1	6	2	5	4	3	6	1	5	2
11	5	6	3	2	4	1	5	6	3	2	4	1	6	5	2	3	1	4
12	6	5	2	3	1	4	6	5	2	3	1	4	5	6	3	2	4	1
13	1	2	5	4	6	3	1	2	5	4	6	3	2	1	4	5	3	6
14	2	1	4	5	3	6	2	1	4	5	3	6	1	2	5	4	6	3
15	3	4	1	6	2	5	3	4	1	6	2	5	4	3	6	1	5	2
16	4	3	6	1	5	2	4	3	6	1	5	2	3	4	1	6	2	5
17	6	5	2	3	1	4	6	5	2	3	1	4	5	6	3	2	4	1
18	5	6	3	2	4	1	5	6	3	2	4	1	6	5	2	3	1	4

Последовательно можно проверить условие совпадения всех характеристических точек объекта и модели по возможным видам совпадения и в результате оценить степень похожести объекта и модели.

**Оценка результатов сравнения.** После сравнения значений углов характеристических точек объекта с точками модели необходимо составить пространственные отношения между ними и сравнить размеры реального объекта и модели. Например, пусть точка  $A_1$  совпадает с точкой  $B_1$ , точка  $A_2$  — с точкой  $B_2$ , точка  $A_3$  — с точкой  $B_4$ , точка  $A_4$  — с точкой  $B_6$ . Тогда для уточнения степени совпадения объекта и модели необходимо проверить условие масштабирования:

$$\frac{l(A_1A_2)}{l(B_1B_2)} \approx \frac{l(A_2A_3)}{l(B_2B_4)} \approx \frac{l(A_3A_4)}{l(B_4B_6)},$$

где  $l(\cdot, \cdot)$  — расстояние между соответствующими точками.

В результате мы можем оценить степени похожести ( $L$ ) и масштаб ( $S$ ) по формулам:

$$L = 100 \% \cdot (\text{число точек совпадения}) / (\text{общее число точек модели});$$

$$S = \frac{100 \%}{n} \left( \frac{l(A_1A_2)}{l(B_1B_2)} + \frac{l(A_2A_3)}{l(B_2B_4)} + \frac{l(A_3A_4)}{l(B_4B_6)} + \dots \right),$$

где  $n$  — число совпавших граней.

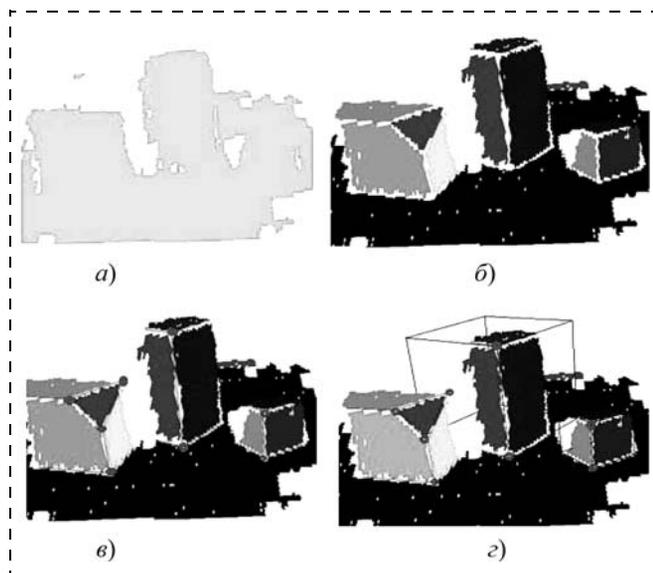
### 3. Экспериментальные исследования

Для подтверждения работоспособности предложенного метода была разработана программа и проведено тестирование предложенных алгоритмов на реальных 3D-сценах. В процессе экспериментов проверялась работоспособность алгоритмов на примере распознавания параллелепипеда.

Исходные параметры восьми характеристических точек модели параллелепипеда представлены в табл. 4.

Таблица 4

Точка $B_j$	$\alpha_{12}^B$	$\alpha_{23}^B$	$\alpha_{13}^B$	$d_{12}^B$	$d_{23}^B$	$d_{13}^B$	$D_{12}^B$	$D_{23}^B$	$D_{13}^B$	$M_1^B$	$M_2^B$	$M_3^B$
$B_1$	90	90	90	80	80	80	6	2	4	1	2	5
$B_2$	90	90	90	80	80	80	7	3	1	2	3	5
$B_3$	90	90	90	80	80	80	8	4	2	3	4	5
$B_4$	90	90	90	80	80	80	5	3	1	1	4	5
$B_5$	90	90	90	80	80	80	4	8	6	1	4	6
$B_6$	90	90	90	80	80	80	1	7	5	1	2	6
$B_7$	90	90	90	80	80	80	2	8	6	2	3	6
$B_8$	90	90	90	80	80	80	3	5	7	3	4	6



**Рис. 7. Последовательность анализа 3D-изображения:**  
*a* — исходное изображение; *б* — результат сегментации; *в* — характерные точки; *г* — результат распознавания

На рис. 7 показана последовательность анализа изображения рабочей сцены, содержащей параллелепипед. Реальное изображение, которое получено от 3D-камеры, приведено на рис. 7, *a*, результаты процедуры сегментации — на рис. 7, *б*. Далее показано выделение восьми характеристических точек сцены (рис. 7, *в*) и результаты сравнения характе-

ристических точек реального объекта с точками модели (рис. 7, *г*).

Как видно из приведенных результатов, алгоритм позволяет достаточно точно распознавать многогранные объекты и может быть использован в системе управления роботами.

### Заключение

Предложенный алгоритм распознавания объемных объектов с использованием их характеристических точек позволяет выполнить сравнение изображений реальных 3D-объектов с их моделями.

Результаты распознавания позволяют определить положение и ориентацию объектов в рабочем пространстве робота и, соответственно, выполнить необходимые действия над ними.

### Список литературы

1. **Нгуен А. В., Михайлов Б. Б.** Способ распознавания многогранных пространственных объектов // Информатика. Телекоммуникации. Управление. Т. 5 (181). СПб: Издательство Политехнического университета, 2013. С. 125—131.
2. **Хрущ А. В.** Алгоритм распознавания препятствий для системы трехмерного технического зрения мобильного робота // Тр. Восьмой Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург. 2005. С. 257—262.
3. **Володин Ю. С., Михайлов Б. Б.** Использование телевизионной системы объемного зрения для обнаружения препятствий // Матер. междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи. СПб: Политехника—сервис, 2009. С. 179—181.
4. **Оппенгейм А., Шафер Р.** Цифровая обработка сигналов. М.: Технофераб, 2007. 856 с.

**B. B. Mikhaylov**, Associate professor, robot@bmstu.ru,

**A. V. Nguyen**, Postgraduate student, vantbtv@mail.ru, Bauman Moscow State Technical University

## The Using Characteristic Points for Recognition of 3D Objects

*Recognition systems are widely used into intelligent robots, especially in robots, which have to work in the real world with the 3D objects. In this paper method of recognition of 3D polyhedral object is considered. Method is based on analysis of the space disposition of object characteristic points. Here characteristic points of object are the points of intersection of three planes of a single object; moreover each point has its own coordinates and list of parameters.*

*We propose the way for description the geometrical relationships of the characteristic points of the 3D object and its model. In paper the algorithm 3D objects recognition using a procedure of space compare the location of characteristic points of the real object and his model is proposed. As part of the characteristic points on the image of the object is not available, the article offered the option of evaluating the degree of coincidence of the object and its model.*

*To test the algorithm program was written and conducted its testing on different real scenes. Experimental studies have confirmed the efficiency of the proposed algorithm recognition of 3D objects and the possibility of its use in robotic systems.*

**Keywords:** robot working space, characteristic points, 3D computer vision system, 3D objects recognition

### References

1. **Nguyen A. V., Mikhaylov B. B.** Sposob raspoznavaniya mnogogrannykh prostranstvennykh ob'ektov. *Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*. Iss. 5 (181). SPb: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2013. P. 125—131.
2. **Khrushch A. V.** Algoritm raspoznavaniya prepyatstviy dlya sistemy trekhmernogo tekhnicheskogo zreniya mobil'nogo robota. *Tr.*

*Vos'moy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sankt-Peterburg. 2005. P. 257—262.*

3. **Volodin Yu. S., Mikhaylov B. B.** Ispol'zovanie televizionnoy sistemy ob'emnogo zreniya dlya obnaruzheniya prepyatstviy. *Mater. mezhdunar. konf. s elementami nauchnoy shkoly dlya molodezhi. SPb: Politekhniko-servis, 2009. P. 179—181.*

4. **Oppengeym A., Shafer R.** Tsifrovaya obrabotka signalov. M.: Tekhnoferab, 2007. 856 p.

УДК 681.51

**Р. Д. Ахметсафин**, канд. техн. наук, доц., akhmetsafinrd@mail.ru, ООО "Газпром георесурс",  
**Р. З. Ахметсафина**, канд. техн. наук, доц., rakhmetsafina@hse.ru,  
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

## Оптимизация вычислений при применении генетических алгоритмов в задаче структурно-параметрической идентификации регрессионных моделей

*Предлагается оптимизация вычислений критерия отбора хромосом (функции выживания) в генетических алгоритмах (ГА), когда допускается рекуррентный пересчет критерия при изменении хромосомы в одном гене. Оптимизация вычислений осуществляется путем решения задачи Штейнера на графах. Задача рассматривается в контексте применения ГА к структурно-параметрической идентификации регрессионных моделей, где: а) ген — регрессор; б) хромосома — набор регрессоров в одной регрессионной модели как подмножество из множества кандидатов в регрессоры; в) популяция — набор регрессионных моделей как подмножество из множества всех возможных моделей; г) критерий отбора — на основе суммы квадратов невязок или ошибки модели; д) изменение хромосомы в одном гене соответствует методам отбора переменных Forward Selection и Backward Elimination.*

**Ключевые слова:** генетические алгоритмы, регрессионные модели, структурно-параметрическая идентификация, задача Штейнера

### Введение

Применение современных эволюционных методов в задачах текущей структурно-параметрической идентификации сопряжено со значительными вычислительными затратами, что может ограничивать их использование для быстротекущих процессов, несмотря на рост производительности вычислительной техники. В работе [1] рассмотрена возможность оптимизации вычислений для пошаговых методов селектирования (*Forward Selection, Backward Elimination*). В данной статье рассматривается такая возможность при применении генетических алгоритмов (ГА) [2].

Как и в работе [1], рассматриваются модели, описываемые уравнениями регрессии вида

$$y(k) = \varphi^T(k, M)\theta(k, M) + e(k), \quad (1)$$

где  $k$  — номер отсчета,  $y(k)$  — текущий выход;  $M$  — множество из  $m$  регрессоров;  $\varphi(k, M)$  — вектор-столбец значений, связанных с историей входа-выхода для множества  $M$  регрессоров;  $\theta(k, M)$  — вектор-столбец текущих весовых коэффициентов при регрессорах;  $e(k)$  — текущая ошибка модели. Рассматривается задача структурно-параметрической идентификации, которая сводится к выбору оптимальной системы функций или регрессоров в уравнении (1) (структурная идентификация), и рассматриваются критерии селектирования моде-

лей на основе суммы квадратов невязок или ошибки модели *RSS (Residual Sum of Squares)* [3–6].

$$RSS = \sum_{i=1}^N \|\hat{y}(i|\theta) - y(i)\|^2 = e^T e, \quad (2)$$

где  $\hat{y}(i|\theta)$  — выход модели с набором параметров  $\theta$ .

Уравнения (1) и (2) в матричной форме имеют вид

$$y(k) = \Phi(k, M)\theta(k) + e(k),$$

$$RSS(k, M) = e^T(k)e(k) = y^T(k)y(k) - F^T(k, M)R^{-1}(k, M)F(k, M), \quad (3)$$

где  $R(k, M) = \Phi^T(k, M)\Phi(k, M)$  — матрица ковариаций;  $F(k, M) = \Phi^T(k, M)y(k)$  — вектор-столбец.

Наибольшие вычислительные затраты связаны с обращением матрицы ковариаций в уравнении (3). В работе [1] рассмотрен алгоритм, позволяющий (на основе обращения окаймленной матрицы) рекуррентно рассчитывать *RSS* при добавлении регрессора  $j$  к множеству регрессоров  $M$  (результатирующее множество  $M_{j+}$ ) и при исключении регрессора  $j$  из множества регрессоров  $M$  (результатирующее множество  $M_{j-}$ ):

$$RSS(k, M_{j+}) = RSS(k, M) - \frac{\beta_j^2(k, M)}{\alpha_j(k, M)}; \quad (4)$$

$$RSS(k, M_{j-}) = RSS(k, M) + \frac{\beta_j^2(k, M_{j-})}{\alpha_j(k, M_{j-})}, \quad (5)$$

где  $\alpha_j(k, M)$ ,  $\beta_j(k, M)$  — скаляры. Оценка вычислительных затрат — число операций типа умножение — составляет  $O(4m^2 + 4m)$ , где  $m$  — мощность множества  $M$ . Общие вычислительные затраты удается значительно снизить при вычислении значений  $RSS$  для всех возможных шагов *Forward Selection* и *Backward Elimination* от текущего множества  $M$  [1].

Пошаговый подход к отбору при структурно-параметрической идентификации вычислительно наиболее эффективен [1], но не гарантирует оптимального решения из-за негладкой зависимости критерия оптимизации на основе  $RSS$  от подбираемых параметров.

### 1. Генетические алгоритмы в задачах селектирования моделей

В отличие от пошагового подхода генетические алгоритмы [7–9] осуществляют стохастический поиск оптимума сразу для нескольких вариантов комбинаций параметров. Процесс поиска включает три основных этапа, повторяемых в цикле:

- эволюция — сдвиг варианта в направлении ожидаемого оптимума с использованием как тенденций изменения критерия по параметрам, так и стохастических "скачков";
- отсеивание "неудачливых" хромосом: выживание;
- скрещивание "удачливых" хромосом: порождение поколений-потомков, сочетающих удачные значения параметров родителей.

Для отсеивания хромосом используется функция выживания на основе суммы квадратов невязок (3).

#### 1.1. Кодирование регрессионных моделей

Самое простое кодирование — бинарное, единица в хромосоме (регрессионной модели) определяет наличие гена (кандидата в регрессоры). В таб-

Кодировка регрессоров

№	Регрессор, ген	Хромосома с одним геном
1	$u(k)$	10000000000000000000
2	$u(k-1)$	01000000000000000000
3	$u(k-2)$	00100000000000000000
4	$u(k-3)$	00010000000000000000
5	$u(k-4)$	00001000000000000000
6	$y(k-1)$	00000100000000000000
7	$y(k-2)$	00000010000000000000
8	$y(k-3)$	00000001000000000000
9	$y(k-4)$	00000000100000000000
10	$u(k-1)y(k-1)$	00000000010000000000
11	$u(k-1)y(k-2)$	00000000001000000000
12	$u(k-1)y(k-3)$	00000000000100000000
13	$u(k-2)y(k-2)$	00000000000010000000
14	$u(k-2)y(k-3)$	00000000000001000000
15	$u(k-2)y(k-4)$	00000000000000100000
16	$(u(k-1))^2$	00000000000000010000
17	$(u(k-2))^2$	00000000000000001000
18	$(u(k-3))^2$	00000000000000000100
19	$(y(k-1))^2$	00000000000000000010
20	1	00000000000000000001

лице приведен пример кодирования для множества кандидатов в регрессоры. Число единиц в коде определяет порядок матриц и, соответственно, число операций при вычислении  $RSS$  по формуле (3). Кроме того, такое представление позволяет оценивать и вычислительные затраты при рекуррентном пересчете по формулам (4), (5). Например, при рекуррентном пересчете  $RSS$  для хромосомы

0110111011010110111

в  $RSS$  для хромосомы

011110101111110111

нужно один раз исключить ген, а затем три раза добавить по одному гену. По объему вычислений это эффективнее, чем расчет для второй хромосомы "с нуля" по формуле (2): 3256 против 5440 операций умножения.

### 2. Постановка задачи

Применение ГА для выбора оптимальной структуры модели при текущей структурно-параметрической идентификации сопровождается большим объемом вычислений  $RSS$ . Основная вычислительная проблема — это обращение матрицы ковариаций в формуле (3) при вычислении функции выживания для каждой особи популяции на каждом поколении (например, 30 особей в 30 поколениях в среднем по 10 регрессоров требуют выполнения 900 обращений матриц  $10 \cdot 10$ ).

Если результат работы [1] интерпретировать в нотации ГА, значительно снижаются общие вычислительные затраты при вычислениях по формулам (4)–(5) для функций выживания популяции, состоящей из всех хромосом, отличающихся одним геном от родительской хромосомы. В данной работе мы попытаемся оценить, насколько удастся снизить общие вычислительные затраты для "обычных" популяций за счет подбора последовательности вычислений по формулам (4), (5) при применении ГА в структурно-параметрической идентификации.

### 3. Оптимизация вычислений функции выживания

#### 3.1. Задача Штейнера на графах

Представим популяцию в виде взвешенного графа, где вершины — хромосомы, а ребра — вычислительные затраты при рекуррентном пересчете функции выживания ( $RSS$ ) от одной хромосомы к другой, в качестве которых примем число операций умножения.

Задача сводится к поиску во взвешенном графе дерева наименьшего веса, покрывающего все вершины. Такая задача известна как *задача Штейнера на графах* (*Steiner's problem in graphs*) [10]. Результатом ее решения является дерево (также представляется взвешенным графом), которое определяет схему или последовательность вычислений  $RSS$ ,

а его вес определяет суммарные вычислительные затраты.

Отметим, что для вершин результирующего графа с кратностью больше двух необходимо зарезервировать память для хранения обратной матрицы ковариаций, так как эти вершины более одного раза участвуют в рекуррентном пересчете.

Алгоритм решения задачи Штейнера на графах представлен в работах [10, 11]. Рассмотрим его эффективность на примере.

### 3.2. Пример

В качестве примера рассмотрим задачу текущей структурно-параметрической идентификации регрессионной моделью с применением ГА для турбовентиляторного двигателя по каналу расход топлива — число оборотов турбины низкого давления (вход—выход представлены на рис. 1) с заданным набором кандидатов в регрессоры (см. таблицу)

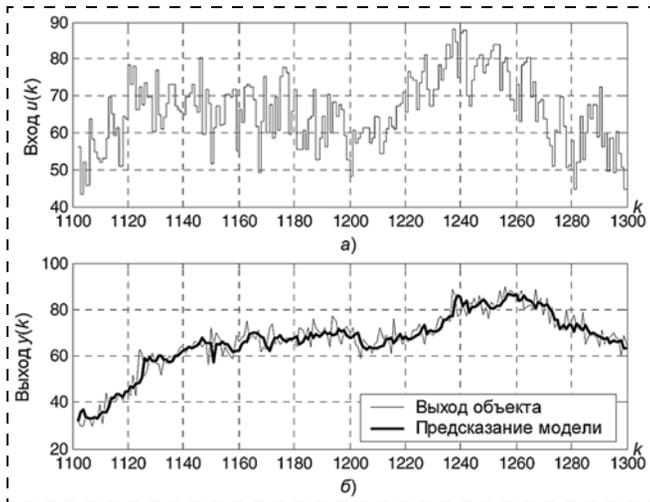


Рис. 1. Вход и выходы объекта и модели:  
а — входной сигнал; б — выходной сигнал и предсказание модели

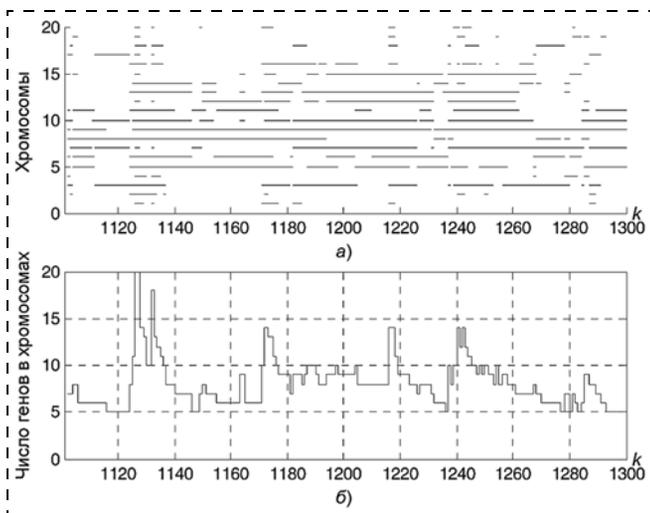


Рис. 2. Результат параметрической идентификации:  
а — состав регрессоров (гены в хромосомах); б — число регрессоров в модели (генов в хромосомах)

и заданных факторе забывания  $\lambda = 0,99$  и норме дисперсии ошибки модели  $\sigma = 16,8$  [1]. На рис. 2, а представлена диаграмма структур регрессионных моделей по результатам шагов текущей структурно-параметрической идентификации. На рис. 2, б представлено общее число регрессоров. Показатель  $RSS$  на шагах идентификации не превышает заданной нормы  $\sigma/(1 - \lambda) = 1680$  (рис. 3, а и 3, б).

На шаге  $k = 1150$  текущей структурно-параметрической идентификации в ГА рассматривалась эволюция 12 поколений популяции (на рис. 4, а представлена эволюция на всех поколениях, на рис. 4, б — результат отбора хромосом в каждом поколении). Популяция 4-го поколения состоит из 29 хромосом (особей). На рис. 5 изображено решение задачи Штейнера на графах — дерево наименьшего веса. Выделенная хромосома 18 является корнем дерева Штейнера. Для оценки функций выживания ( $RSS$ ) для всей популяции по формуле (3)

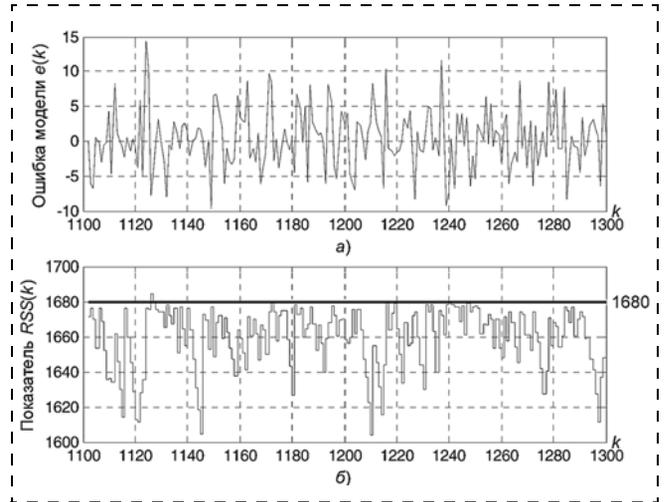


Рис. 3. Ошибка модели (а); показатель  $RSS$  (функция выживания) (б)

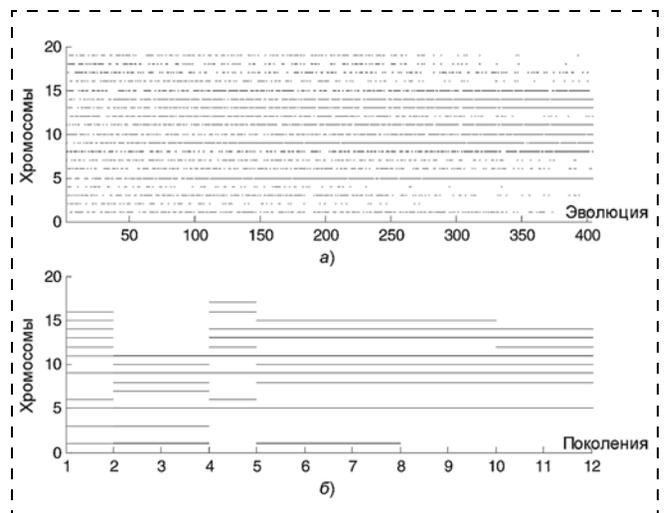


Рис. 4. Эволюция на шаге  $k = 1150$ :  
а — гены в хромосомах всех поколений; б — результат отбора хромосом (состав генов) в 12 поколениях

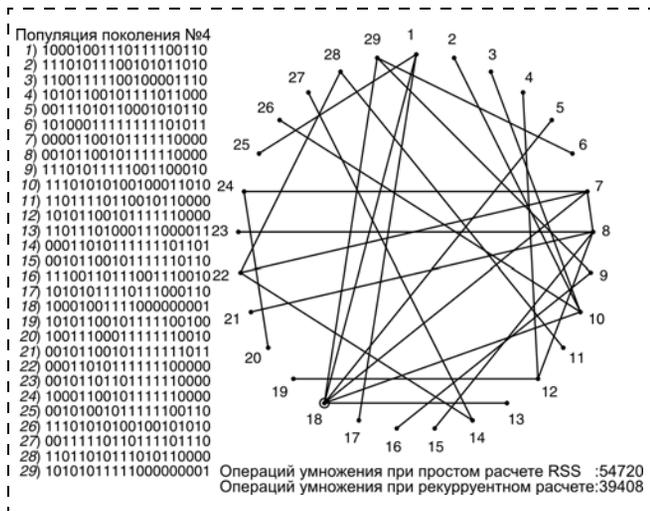


Рис. 5. Дерево Штейнера для оптимизации расчета функции выживания (*RSS*) для всех хромосом популяции № 4 на шаге  $k = 1150$

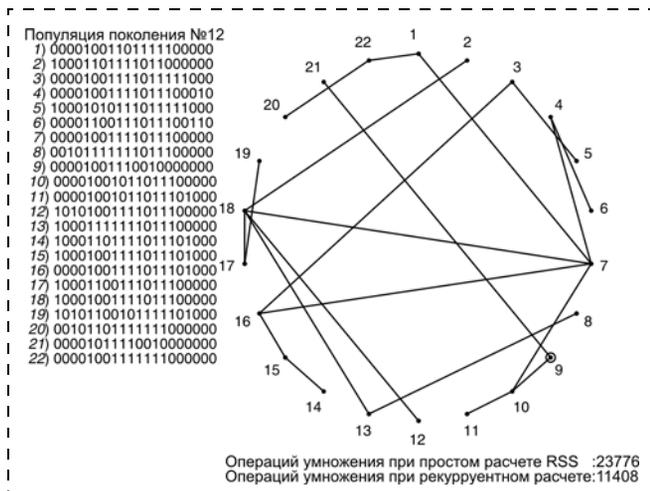


Рис. 6. Дерево Штейнера для оптимизации расчета *RSS* популяции поколения № 12 на шаге  $k = 1150$

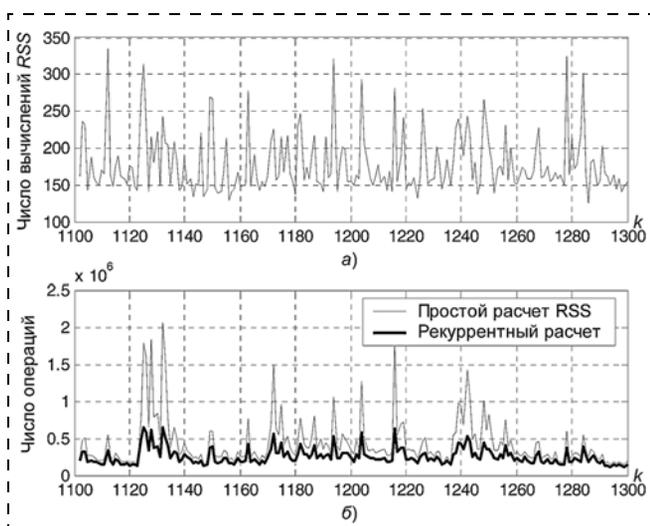


Рис. 7. Объем вычислительных затрат:  
 а — общее число анализируемых хромосом (число вычислений *RSS*); б — сопоставление числа операций типа умножение для расчета *RSS*

потребуется выполнение 54 720 операций умножения. Рекуррентный пересчет (4)—(5) по схеме решения задачи Штейнера на графах снижает это число до 39 408.

На 12-м поколении шага  $k = 1150$  идентификации (рис. 6) популяция состоит уже из 22 хромосом, для вычисления всех функций выживания "с нуля" потребуется 23 776 операций умножения, а с использованием предлагаемого подхода — только 11 408.

Среднее соотношение операций умножения по всем поколениям для 200 ( $k = 1101...1300$ ) шагов структурно-параметрической идентификации рассматриваемого примера простым и рекуррентным расчетом составило 1.7:1.0 (рис. 7). При этом мы не учитывали вычислительные затраты решения задачи Штейнера.

### Заключение

Не скроем, мы ожидали большей эффективности. Прорыва не получилось. Тем не менее, мы считаем, что полученный результат исследования по оптимизации вычислений при текущей структурно-параметрической идентификации с применением ГА в целом и в частной постановке "оптимизация вычислений некоторой целевой функции, допускающей рекуррентный пересчет между состояниями, для каждого из набора состояний" может быть интересен читателям.

Итак, для снижения вычислительных затрат при структурно-параметрической идентификации объектов управления регрессионными моделями с применением ГА предложена последовательность вычислений функций отбора регрессоров (функций выживания хромосом популяции) в виде графа решения задачи Штейнера.

Программная реализация опубликованных в работах [10, 11] алгоритмов решения задачи Штейнера на графах проблем не вызывает (есть и готовые решения в MATLAB).

Можно также сделать выводы по использованию ГА в задачах структурно-параметрической идентификации (в том числе и текущей) объектов управления регрессионными моделями:

- 1) высокая сходимость к оптимальной структуре модели;
- 2) доступность программной реализации;
- 3) некоторые ограничения в применении текущей идентификации для быстротекущих процессов из-за больших вычислительных затрат.

### Приложение. Евклидова задача Штейнера

Теперь о том, что не удалось реализовать. Вернемся к примеру рекуррентного пересчета *RSS* для хромосомы с удалением одного гена и добавлением трех генов. Три дополнительно рассчитанные вершины (хромосомы) в дальнейшем не учитываются при расчете других вершин (хромосом популяции). Если эти дополнительные вершины появятся при

пересчете другой вершины, расчет для них проводится заново. Так как в задаче Штейнера на графах рассматривается только выделенное подмножество вершин (здесь — все хромосомы одной популяции), то можно предположить, что существует решение с меньшим числом вычислений. Предположение заключается в том, что если исходное множество вершин  $P$  расширить некоторым дополнительным набором до множества  $P_1$ , то вес оптимального дерева, покрывающего все вершины  $P_1$  (а следовательно, и все вершины  $P$ ), окажется меньше веса оптимального дерева, покрывающего только вершины  $P$ . В такой постановке задача носит название *евклидова задача Штейнера (Steiner's problem in Euclid plane)* [10].

Точки множества  $P$  соединяются на плоскости так, чтобы минимизировать суммарную длину отрезков. Если не допускаются пересечения любых двух линий в точках вне заданного множества  $P$ , то задача сводится к определению кратчайшей связывающей сети эквивалентного графа на  $|P|$  вершинах с матрицей весов, вычисленных как евклидово расстояние между точками множества  $P$ .

Если ввести дополнительные искусственные вершины, называемые точками Штейнера, то вес (длину) кратчайшей связывающей сети можно уменьшить соответствующим подбором точек. Получающееся оптимальное дерево называют *наикратчайшим деревом Штейнера* [10]. Интересно, что в работах [12—14] рассматривается решение этой задачи с применением ГА. В работах [15, 16] представлено преобразование задачи Штейнера на евклидовой плоскости к задаче Штейнера на графе.

Реализовать подходы решения евклидовой задачи Штейнера для структурно-параметрической идентификации с применением ГА пока не удалось. Возможно, снижение вычислительных затрат там может оказаться более весомым.

## Список литературы

1. Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З. Вычислительные затраты пошаговых методов поиска при идентификации регрессионных моделей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 4. С. 9—14.
2. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
3. Larose Daniel T. Data Mining methods and models. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006. 322 p.
4. Эйхгофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 321 с.
5. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 432 с.
6. Wei H. L., Billings S. A. Model structure selection using an integrated forward orthogonal search algorithm assisted by squared correlation and mutual information // International Journal of Modelling, Identification and Control. 2008. N. 3 (4). P. 341—356.
7. Goldberg D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. New York, Addison Wesley, 1989.
8. Hasan Örkçü H. Subset selection in multiple linear regression models: a hybrid of genetic and simulated annealing algorithms // Applied Mathematics and Computation. 2013. V. 219. N. 23. P. 11018—11028.
9. Ghosh S., MaKa S. Genetic algorithm based NARX model identification for evaluation of insulin sensitivity // Applied Soft Computing. 2011. V. 11. N. 1. P. 221—226.
10. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
11. Романовский И. В. Задача Штейнера на графах и динамическое программирование // Компьютерные инструменты в образовании. 2004. № 2. С. 80—86.
12. Полуэктова Е. Б. Способ применения генетических алгоритмов для задачи Штейнера на графе // Информационный бюллетень ассоциации математического программирования. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. № 10. С. 202—203.
13. Калашников Р. С. Построение дерева Штейнера методом генетического поиска // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. 2005. № 2 (22). URL: <http://pitis.tsure.ru/>
14. Курейчик В. В., Сороколетов П. В. Генетический поиск при построении связывающих деревьев // Программные продукты и системы. 2007. № 4.
15. Лотарев Д. Т., Уздемир А. П. Преобразование задачи Штейнера на евклидовой плоскости к задаче Штейнера на графе // АИТ. 2005. № 10. С. 82—92.
16. Рыженко Н. В. Алгоритм построения минимальных связывающих деревьев с дополнительными вершинами (деревьев Штейнера) для случая прямоугольной метрики // Труды ИМВС РАН. 2002. № 3.

**R. D. Akhmetsafin**, Chief technologist, akhmetsafinrd@mail.ru.  
 Limited Liability Company "Gazprom georesurs" (LLC "Gazprom georesurs"),  
**R. Z. Akhmetsafina**, Associate professor, rakhmetsafina@hse.ru,  
 National Research University Higher School of Economics (NRU HSE)

## Computing Optimization at Genetic Algorithms Application to Online Identification of Regression Model

*The computationally efficient method of fitness function evaluation (criterion for chromosomes selection) in genetic algorithms (GA) is discussed in this paper. This method may be used if a single gene modifies chromosome.*

*Steiner's problem in graphs is solved for the computing optimization. Population is represented as a weighted graph. Vertices of that graph represent chromosomes, edges represent the computational cost of selection criteria recurrent calculation. The GA application for identification of regression models assumes (a) gene is a regressor;*

*(b) chromosome is the set of regressors in single regression model (subset of all candidates);*

*(c) population — set of regression models (subset of all possible models); (d) selection criteria — residual sum of squares (RSS);*

*(e) the chromosome modification by modification of one gene corresponds to the forward selection and backward elimination methods of variables (regressors) selection.*

**Keywords:** genetic algorithms; regression model, Steiner's problem in graphs, system identification

## References

1. **Akhmetasafin R. D., Akhmetasafina R. Z.** Vychislitel'nye zatraty poshagovykh metodov poiska pri identifikatsii regressionnykh modeley. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2014. N. 4. P. 9—14.
2. **Gladkov L. A., Kureychik V. V., Kureychik V. M.** Geneticheskie algoritmy. M.: Fizmatlit, 2006. 320 p.
3. **Larose Daniel T.** Data Mining methods and models. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006. 322 p.
4. **Eykhoff P.** Osnovy identifikatsii sistem upravleniya. M.: Mir, 1975. 321 p.
5. **L'Yung L.** Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya: Per. s angl. / Pod red. Ya. Z. Tsyapkina. M.: Nauka. 01. red. fiz.-mat. lit., 1991. 432 p.
6. **Wei H. L., Billings S. A.** Model structure selection using an integrated forward orthogonal search algorithm assisted by squared correlation and mutual information. *International Journal of Modelling, Identification and Control*. 2008. N. 3 (4). P. 341—356.
7. **Goldberg D. E.** Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. New York, Addison Wesley, 1989.
8. **Hasan Örkçü H.** Subset selection in multiple linear regression models: a hybrid of genetic and simulated annealing algorithms. *Applied Mathematics and Computation*. 2013. V. 219, N. 23. P. 11018—11028.
9. **Ghosh S., Maka S.** Genetic algorithm based NARX model identification for evaluation of insulin sensitivity. *Applied Soft Computing*. 2011. V. 11, N. 1. P. 221—226.
10. **Kristofides N.** Teoriya grafov. Algoritmicheskiy podkhod. M.: Mir, 1978. 432 p.
11. **Romanovskiy I. V.** Zadacha Shteynera na grafakh i dinamicheskoe programmirovaniye. *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii*. 2004. N. 2. P. 80—86.
12. **Poluektova E. B.** Sposob primeneniya geneticheskikh algoritmov dlya zadachi Shteynera na grafe. *Informatsionnyy byulleten' asotsiatsii matematicheskogo programmirovaniya*. Ekaterinburg: UrO RAN, 2003. N. 10. P. 202—203.
13. **Kalashnikov R. S.** Postroeniye dereva Shteynera metodom geneticheskogo poiska. *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii i intellektual'nye sistemy*. 2005. N. 2 (22). URL: <http://pitis.tsure.ru/>
14. **Kureychik V. V., Sorokoletov P. V.** Geneticheskiy poisk pri postroenii svyazyvayushchikh derev'ev. *Programmnye produkty i sistemy*. 2007. N. 4.
15. **Lotarev D. T., Uzdemir A. P.** Preobrazovaniye zadachi Shteynera na evklidovoy ploskosti k zadache Shteynera na grafe. *AiT*. 2005. N. 10. P. 82—92.
16. **Ryzenko N. V.** Algoritm postroeniya minimal'nykh svyazyvayushchikh derev'ev s dopolnitel'nymi vershinami (derev'ev Shteynera) dlya sluchaya pryamougol'noy metriki. *Trudy IMVS RAN*. 2002. N. 3.

УДК 681.518; 004.896

**М. В. Бобырь**, д-р техн. наук, доц., [fregat\\_mn@rambler.ru](mailto:fregat_mn@rambler.ru), **В. С. Титов**, д-р техн. наук, проф.,  
**Н. А. Милостная**, канд. техн. наук, преподаватель, [nat\\_mil@mail.ru](mailto:nat_mil@mail.ru),  
Юго-Западный государственный университет, г. Курск

## Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний\*. Часть 2\*\*

*Обсуждается возникающая при обучении нечетких баз знаний задача, связанная с уменьшением среднеквадратического отклонения между значениями, которые формируются на выходе механизма вывода, и данными, полученными по обучающей выборке экспериментальных данных. Рассмотрены методы обучения мягких нечетких баз знаний, дающие возможность оценить эффективность предложенных решений по минимизации среднеквадратического отклонения.*

**Ключевые слова:** нечетко-логический вывод, нечеткая база знаний, адаптация, прогнозирование, мягкие вычисления, модифицированный алгоритм нечетко-логического вывода, регрессия, аддитивность, среднеквадратическое отклонение

### Введение

Современные интеллектуальные модели обучения мехатронных систем в качестве механизмов обучения используют:

- искусственные нейронные сети (ANN — artificial neural network);
- радиально-базисные нейронные сети (RBFNN — radial basis function neural network);
- радиально-базисные нейронные сети с нечеткими системами (RBFNN-FL — radial basis function neural network — fuzzy logic);
- адаптивные нейро-нечеткие системы вывода (ANFIS — adaptive neuro-fuzzy inference system) [1—3].

\* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках гранта Президента РФ НШ-2357.2014.8.

\*\* Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" № 10, 2014

Как показал проведенный анализ указанных источников, в среднем параметр среднеквадратического отклонения (RMSE — root mean squared error) для вышеуказанных работ не превышает 10 единиц, а средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE — mean absolute percentage error) составляет более 90 единиц. Такое значение показателей объясняется использованием в системах нечеткого вывода жестких вычислений. При этом для получения самой обучающей выборки используются средства многофакторного регрессионного анализа [4—7]. В данных работах величина RMSE также не превышает 10 единиц. Это объясняется тем, что в анализируемых статьях не уделено внимание вопросам, связанным с разработкой и модификацией самих алгоритмов обучения вышеуказанных систем принятия решений, а в качестве традиционного алгоритма обучения используются средства специализированного программного продукта MATLAB (Fuzzy

Logic ToolBox и ANFIS) [8]. Таким образом, разработка новых методов обучения нечетких баз знаний, позволяющих минимизировать среднеквадратическую ошибку, очевидна. В данной статье рассмотрена пошаговая реализация метода обучения мягких баз знаний и оценка показателя RMSE для жестких и мягких вычислительных решений, использующихся в системах нечеткого вывода.

### Многофакторная регрессионная модель

Для оценки обучения нечеткой базы знаний авторы предлагают использовать либо экспериментальные данные, полученные в ходе проведения соответствующих исследований, либо выборку, полученную на основе регрессионного анализа. Для синтеза многофакторной регрессионной модели предлагается использовать методику, представленную в работах [9, 10]. Ее решение основано на решении системы уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \Sigma y = na' + a_1 \Sigma a'_1 + a_2 \Sigma a'_2, \\ \Sigma ya_1 = a' \Sigma a'_1 + a_1 \Sigma a'^2_1 + a_2 \Sigma a'_1 a'_2, \\ \Sigma ya_2 = a' \Sigma a'_2 + a_1 \Sigma a'_1 a'_2 + a_2 \Sigma a'^2_2. \end{cases}$$

Исходной информацией для построения уравнения регрессии являются данные, приведенные в табл. 1.

Используя данные табл. 1, формируем систему уравнений

$$\begin{cases} 9103 = 20a' + 904a_1 + 5088a_2; \\ 410\,784 = 904a' + 46\,046a_1 + 228\,261a_2; \\ 2\,318\,006 = 5088a' + 228\,261a_1 + 1\,304\,368a_2. \end{cases}$$

Далее вычисляется общий определитель матрицы

$$\Delta = \begin{vmatrix} na' & a_1 \Sigma a'_1 & a_2 \Sigma a'_2 \\ a' \Sigma a'_1 & a_1 \Sigma a'^2_1 & a_2 \Sigma a'_1 a'_2 \\ a' \Sigma a'_2 & a_1 \Sigma a'_1 a'_2 & a_2 \Sigma a'^2_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 20 & 904 & 5088 \\ 904 & 46046 & 228261 \\ 508 & 228261 & 1304368 \end{vmatrix} = 976\,114\,572.$$

Затем находятся частные определители системы

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} na' & \Sigma y & a_2 \Sigma a'_2 \\ a' \Sigma a'_1 & \Sigma ya_1 & a_2 \Sigma a'_1 a'_2 \\ a' \Sigma a'_2 & \Sigma ya_2 & a_2 \Sigma a'^2_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 20 & 9103 & 5088 \\ 904 & 410784 & 228261 \\ 5088 & 2318006 & 1304368 \end{vmatrix} = -58\,435\,576;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} na' & a_1 \Sigma a'_1 & \Sigma y \\ a' \Sigma a'_1 & a_1 \Sigma a'^2_1 & \Sigma ya_1 \\ a' \Sigma a'_2 & a_1 \Sigma a'_1 a'_2 & \Sigma ya_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 20 & 904 & 9103 \\ 904 & 46046 & 410784 \\ 5088 & 228261 & 2318006 \end{vmatrix} = 205\,381\,800;$$

Таблица 1

Таблица для расчета уравнения регрессии

№	$a'_1$	$a'_2$	$y$	$a'_1 y$	$a'_2 y$	$a'^2_1$	$a'^2_2$	$a'_1 a'_2$	$y^2$
1	45	214	452	20 340	96 728	2025	45 796	9630	204 304
2	40	255	470	18 800	119 850	1600	65 025	10 200	220 900
3	27	251	439	11 853	110 189	729	63 001	6777	192 721
4	35	242	458	16 030	110 836	1225	58 564	8470	209 764
5	24	270	452	10 848	122 040	576	72 900	6480	204 304
6	73	249	442	32 266	110 058	5329	62 001	18 177	195 364
7	29	284	473	13 717	134 332	841	80 656	8236	223 729
8	41	238	431	176 71	102 578	1681	56 644	9758	185 761
9	21	275	468	9828	128 700	441	75 625	5775	219 024
10	21	284	467	9807	132 628	441	80 656	5964	218 089
11	66	278	472	31 152	131 216	4356	77 284	18 348	222 784
12	50	216	457	22 850	98 712	2500	46 656	10 800	208 849
13	69	221	450	31 050	99 450	4761	48 841	15 249	202 500
14	35	244	457	15 995	111 508	1225	59 536	8540	208 849
15	50	256	437	21 850	111 872	2500	65 536	12 800	190 969
16	66	258	449	29 634	115 842	4356	66 564	17 028	201 601
17	45	273	448	20 160	122 304	2025	74 529	12 285	200 704
18	65	288	464	30 160	133 632	4225	82 944	18 720	215 296
19	49	263	457	22 393	120 191	2401	69 169	12 887	208 849
20	53	229	460	24 380	105 340	2809	52 441	12 137	211 600
$\Sigma$	<b>904</b>	<b>5088</b>	9103	<b>410 784</b>	<b>2 318 006</b>	<b>46 046</b>	<b>1 304 368</b>	<b>228 261</b>	4 145 961
	$\Sigma a'_1$	$\Sigma a'_2$		$\Sigma a'_1 y$	$\Sigma a'_2 y$	$\Sigma a'^2_1$	$\Sigma a'^2_2$	$\Sigma a'_1 a'_2$	

Прогнозирование выходной реакции  $y_{\text{per}}$  на основе уравнения регрессии

$a_2$	$a_1$									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
210	447,8	447,2	446,6	446	445,4	444,8	444,2	443,6	443	442,4
220	449,9	449,3	448,7	448,1	447,5	446,9	446,3	445,7	445,1	444,5
230	452	451,4	450,8	450,2	449,6	449	448,4	447,8	447,2	446,6
240	454,1	453,5	452,9	452,3	451,7	451,1	450,5	449,9	449,3	448,7
250	456,2	455,6	455	454,4	453,8	453,2	452,6	452	451,4	450,8
260	458,3	457,7	457,1	456,5	455,9	455,3	454,7	454,1	453,5	452,9
270	460,4	459,8	459,2	458,6	458	457,4	456,8	456,2	455,6	455
280	462,5	461,9	461,3	460,7	460,1	459,5	458,9	458,3	457,7	457,1
290	464,6	464	463,4	462,8	462,2	461,6	461	460,4	459,8	459,2

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 9103 & 904 & 5088 \\ 410784 & 46046 & 228261 \\ 2318006 & 228261 & 1304368 \end{vmatrix} = 394\ 670\ 705\ 561.$$

Зная общий и частные определители системы, можно вычислить коэффициенты регрессии

$$a_1 = \frac{-58435576}{976114572} = -0,06, \quad a_2 = \frac{205381800}{976114572} = 0,21, \\ a' = \frac{394679705561}{976114572} = 404,3.$$

Затем синтезируется уравнение многофакторной регрессии

$$y_{\text{per}} = 404,3 - 0,06a_1 + 0,21a_2. \quad (1)$$

Используя уравнение (7), рассчитываем значение выходного параметра  $y_{\text{per}}$ . Полученные данные представлены в табл. 2.

Данные табл. 2 позволяют построить график, показывающий возможные значения выходного параметра  $y_{\text{per}}$  мехатронной системы при определенных значениях входных параметров  $a_1$  и  $a_2$  (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Следует отметить, что при использовании регрессионного анализа синтезируются только линейные зависимости, в то время как нечеткий вывод формирует как линейные, так и нелинейные взаимосвязи.

Таким образом, задача обучения нечеткой базы знаний сводится к преобразованию нелинейной взаимосвязи, получаемой в ходе моделирования нечетко-логической системы (см. часть 1, рис. 3) в линейную зависимость, полученную при моделировании уравнения регрессии (см. рис. 1).

### Критерий оценки обучения нечетких баз знаний

Задача обучения нечеткой базы знаний, синтезированной в первой части статьи, по выборке, полученной на основе уравнения регрессии (1), сводится к поиску вектора таких значений, при которых среднеквадратическое отклонение будет минимально:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{w} \sum_{i=1}^w (y_{d_i} - y_{\text{per}_i})^2} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $w$  — число измерений в выборке.

С учетом критерия (2) были проведены расчеты среднеквадратического отклонения для данных, полученных при моделировании жесткой и мягкой нечетких баз знаний (см. часть 1, табл. 4, 5), и данных, полученных при моделировании уравнения регрессии (см. табл. 2). В таблицах число отсчетов составило  $w = 90$  единиц. Так, для жесткой нечеткой базы знаний  $RMSE_{\text{hard}} = 85,88$ , а для мягкой нечеткой базы знаний  $RMSE_{\text{soft}} = 17,03$ . Высокое значение коэффициента  $RMSE_{\text{hard}}$  объясняется наличием нулевых результатов, получаемых при использовании жестких формул в структуре нечетко-логического вывода, так как у жестких нечетких баз знаний отсутствует аддитивность. Например, в табл. 4 (см. часть 1) в точке (10, 290) имеет значение  $y_{d,\text{hard}} = 0$ , следовательно, квадрат разности  $(y_{d,\text{hard},i} - y_{\text{per},i})^2 = (0 - 464,6)^2 = 215853,2$  имеет большое значение, и эта разность будет существенно влиять на большее значение коэффициента  $RMSE_{\text{hard}}$ . Следует отметить, что  $y_{d,\text{hard}} = 0$  наблюдается в трех точках (см. часть 1, табл. 4). Появление подобных значений при использовании мягких вычислений исключено, т. е.  $y_{d,\text{soft}} \neq 0$ , поэтому и величина  $RMSE_{\text{soft}}$  в 5 раз меньше, чем  $RMSE_{\text{hard}}$ .

Для минимизации коэффициента  $RMSE$  необходимо смещать влево или вправо термы выходной переменной таким образом, чтобы его значение было минимально. Ниже рассмотрим метод обучения нечеткой системы, позволяющей минимизировать коэффициент  $RMSE$ .

### Метод обучения нечеткой базы знаний

Разберем пошагово метод обучения нечеткой базы знаний, использующей в своей структуре жесткие и мягкие вычисления.

**Шаг 1.** Расчет уровня смещения термов выходной переменной  $\Delta_y$  в крайних и средних точках с использованием градиентного метода [11]:

$$\Delta_y = \delta(y_{d_i} - y_{\text{per}_i}) \text{ при } \sigma = y_{d_i} - y_{\text{per}_i} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $\sigma$  — погрешность обучения;  $\delta$  — скорость обучения;  $y_{d_i}$  — числовое значение, вычисленное нечетко-логической системой вывода, на  $i$ -м шаге обу-

Таблица 3

Данные для обучения нечеткой базы данных

Координаты	Крайние точки		Средняя точка
	$a_1$	$a_2$	
$a_1$	20	70	50
$a_2$	220	270	250

чения;  $y_{рег_i}$  — числовое значение, вычисленное по уравнению регрессии, на  $i$ -м шаге обучения.

Расчет уровня смещения для термов выходной переменной заканчивается, когда погрешность обучения  $\sigma = 0$ . Рассмотрим обучение нечеткой базы данных для двух и одной средней точек (табл. 3).

Согласно формуле (2) найдем смещение термов выходной переменной, используя разные значения скорости обучения ( $\delta = 0,2$  и  $\delta = 0,7$ ). Так, в точке  $(a_1, a_2) = (20, 220)$  выходное значение, полученное с помощью жесткой нечеткой базы знаний,  $y_{di} = 468,51$  (см. часть 1, табл. 4), а значение  $y_{рег_i} = 449,3$  (см. табл. 2).

Для нахождения смещения  $\Delta_{y,hard} = -19,21$  при использовании жестких обучений потребовалось со скоростью  $\delta = 0,2$  выполнить 32 итерации обучения, а при  $\delta = 0,7$  — семь итераций обучения. При использовании мягких вычислений для нахождения смещения  $\Delta_{y,soft} = -19,74$  также потребовалось выполнить со скоростью  $\delta = 0,2$  32 итерации обучения, а при  $\delta = 0,7$  — семь итераций обучения (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Видно, что для обучения целесообразно использовать скорость обучения, равную  $\delta = 0,7$ , так как при этом значении число итераций сокращается в 4,5 раза, при достижении минимального значения погрешности обучения. Далее термы выходной переменной  $y$  были сдвинуты на соответствующие значения  $\Delta_{y,hard}$ ,  $\Delta_{y,soft}$  и согласно методу заполнения нечетких баз знаний, разработанному в части 1 статьи, были получены новые выходные значения мехатронной системы. В табл. 4 приведены данные только для моделирования мягких нечетких баз знаний.

Затем был проведен расчет среднеквадратического отклонения для новых результатов, полученных при моделировании жестких и мягких нечетких баз знаний:  $RMSE_{hard} = 88,66$  и  $RMSE_{soft} = 27,96$ . Как и следовало ожидать, значение ошибки ухудшилось для жесткой нечеткой базы знаний в 1,03 раза, а для мягкой — в 1,65 раза соответственно.

Далее было проведено аналогичное обучение для других точек (табл. 5).

Анализ табл. 5 показал, что обучение в других точках также ухудшает коэффициент  $RMSE$ , что не соответствует критерию обучения (2).

**Шаг 2.** Определение среднего уровня смещения термов выходной переменной  $\Delta_{у,сред}$  и расчет среднеквадратического отклонения. Данный расчет выполняется по формуле

$$\Delta_{у,сред} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{y_i}}{n} = \frac{-19,74 + 15,3 + 26,71}{3} = 7,42, \quad (4)$$

где  $\Delta_{y_i}$  — уровень смещения на  $i$ -м шаге обучения;  $n$  — число точек обучения, в данном примере  $n = 3$ .

При моделировании жесткой и мягкой нечетких баз знаний были получены результаты, представленные в табл. 6.

Анализ табл. 6 показал, что по среднему значению наблюдается незначительное улучшение результатов по параметру  $RMSE$ : для жесткой нечеткой базы знаний — в 1,003 раза, а для мягкой — в 1,08 раза соответственно.

**Шаг 3.** Изменение направления смещения термов выходной переменной. Для дальнейшей минимизации коэффициента  $RMSE$  необходимо изменить уровень смещения термов выходной переменной: термы выходной переменной  $y_1$  и  $y_2$  сдвинуть вправо на соответствующие уровни смещения, а термы  $y_3$  и  $y_4$  сместить влево. Термы выходной переменной после модификации представлены на рис. 3 (см. третью сторону обложки) [12, 13].

Моделирование дало следующие результаты:  $RMSE_{hard} = 85,05$  и  $RMSE_{soft} = 12,05$ . После этого шага также наблюдается улучшение в значении па-

Таблица 4

Моделирование мягкой нечеткой базы знаний при смещении выходных термов на величину  $\Delta_{y,soft} = -19,74$ 

$a_2$	$a_s$									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
210	440,25	450,72	443,03	430,77	428,4	426,38	425,27	426,54	440,25	440,25
220	440,25	449,3	442,84	433,2	431,21	429,83	429,28	430,69	440,25	440,25
230	440,29	448,56	442,58	434,11	432,3	430,97	430,5	431,94	440,29	440,29
240	435,41	447,37	442,67	433,11	431,06	429,77	429,29	430,54	435,41	435,41
250	423,83	441,4	435,96	423,81	423,01	422,62	422,48	422,8	423,83	423,83
260	414,78	435,93	428,77	419,06	418,07	416,44	416,26	415,76	414,78	414,78
270	408,77	435,87	428,54	419,01	417,93	416,26	413,89	412,87	408,77	408,77
280	409,68	443,72	435,91	423,69	422,18	420,12	417,14	416,28	409,68	409,68
290	450	450,93	442,92	428,52	425,9	423,44	420,21	420,19	450	450

Таблица 5

Расчет уровней смещения и среднеквадратического отклонения

Координата ( $a_1, a_2$ )	Смещение		Ошибка $RMSE$	
	$\Delta_{y,hard}$	$\Delta_{y,soft}$	$RMSE_{hard}$	$RMSE_{soft}$
(50, 250)	15,67	15,3	85,89	17,16
(70, 250)	26,74	26,71	87,27	25,76

Таблица 6

Моделирование при среднем уровне смещения

Смещение		Ошибка $RMSE$	
$\Delta_{y,hard}$	$\Delta_{y,soft}$	$RMSE_{hard}$	$RMSE_{soft}$
7,73	7,42	85,58	15,72

раметра  $RMSE$ : для жесткой нечеткой базы знаний — в 1,01 раза, а для мягкой — в 1,4 раза соответственно.

**Шаг 4.** Анализ результатов моделирования и инвертирования правил в системе нечетких правил управления (см. часть 1, табл. 2).

С учетом вышесказанного инвертирование правил управления даст систему, представленную в табл. 7.

После инвертирования правил управления моделирование нечеткой базы знаний дало следующие результаты:  $RMSE_{hard} = 84,5$  и  $RMSE_{soft} = 7,36$ . По завершении этого шага также наблюдается улучшение в значении параметра  $RMSE$ : для жесткой нечеткой базы знаний — в 1,02 раза, а для мягкой — в 2,3 раза соответственно. Графики, моделирующие поверхность отклика мехатронной системы на основе мягких вычислений после реализации 3-го и 4-го шагов рассматриваемого метода обучения приведены на рис. 4 (см. третью сторону обложки).

Приведенные вычисления показывают, что мягкая нечеткая база знаний по сравнению с жесткой способна прогнозировать в  $84,5/7,36 = 11,48$  раза точнее.

Дальнейшее увеличение точности прогнозирования и обучения мягкой нечеткой базы знаний возможно за счет исследования влияния каждого термина выходной переменной [14—16] на результат работы механизма нечетко-логического вывода, рассмотренного в первой части статьи.

Таблица 7

Модифицированная система нечетких правил управления

НП	Если	То	НП	Если	То	НП	Если	То			
НП <sub>1</sub>	$a_{11}$	$a_{21}$	$y_1$	НП <sub>4</sub>	$a_{12}$	$a_{21}$	$y_2$	НП <sub>7</sub>	$a_{13}$	$a_{21}$	$y_3$
НП <sub>2</sub>	$a_{11}$	$a_{22}$	$y_2$	НП <sub>5</sub>	$a_{12}$	$a_{22}$	$y_3$	НП <sub>8</sub>	$a_{13}$	$a_{22}$	$y_4$
НП <sub>3</sub>	$a_{11}$	$a_{23}$	$y_3$	НП <sub>6</sub>	$a_{12}$	$a_{23}$	$y_4$	НП <sub>9</sub>	$a_{13}$	$a_{23}$	$y_5$
НП <sub>10</sub>	$a_{11}$		$y_1$	НП <sub>12</sub>	$a_{13}$		$y_4$	НП <sub>14</sub>	$a_{22}$		$y_3$
НП <sub>11</sub>	$a_{12}$		$y_3$	НП <sub>13</sub>	$a_{21}$		$y_2$	НП <sub>15</sub>	$a_{23}$		$y_5$

## Заключение

В статье предложено использовать мягкие нечеткие базы знаний для прогнозирования поведения мехатронной системы. Приведенные примеры подтверждают возможность обучения традиционных нечетких систем с мягкой базой знаний. Рассмотренный в статье пример продемонстрировал, что мягкой нечеткой базой знаний можно с точностью 7,3 % аппроксимировать двухфакторные регрессионные модели, при этом мягкая модель в 11,48 раза точнее прогнозирует состояние системы. Также в рассмотренном методе заложена возможность преобразования нечеткой нелинейной модели в линейную.

Другим положительным моментом, предложенным в статье, является возможность соединения в мягкой нечеткой базе знаний экспертных знаний функционирования мехатронных систем с аналитическими зависимостями теории нечетких множеств и логики.

## Список литературы

1. Kumanan S., Jesuthanam C. P., Kumar R. A. Application of multiple regression and adaptive neuro fuzzy inference system for the prediction of surface roughness // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. V. 35. Iss. 7—8. P. 778—788.
2. Karakus M., Tutmez B. Fuzzy and Multiple Regression modelling for Evaluation of Intact Rock Strength Based on Point Load, Schmidt Hammer and Sonic Velocity // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2006. V. 39. Iss. 1. P. 45—57.
3. Saedi O., Torabi S. R., Ataei M. Prediction of the Rock Mass Diggability Index by Using Fuzzy Clustering-Based, ANN and Multiple Regression Methods // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014. V. 47. Iss. 2. P. 717—732 (DOI 10.1007).
4. Бодин О. Н., Полосин В. Г., Балахонова С. А. Разработка и исследование модели восстановления миокарда для прогнозирования АВ блокад // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 12. С. 59—64.
5. Ротштейн А. П., Штовба С. Д. Моделирование надежности человека-оператора с помощью нечеткой базы знаний Сугено // Автоматика и телемеханика. 2009. № 1. С. 180—187.
6. Khan U. T., Valeo C., He J. Non-linear fuzzy-set based uncertainty propagation for improved DO prediction using multiple-linear regression // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2013. V. 27. Iss. 3. P. 599—616.
7. Satapathy S. M., Kumar M., Rath S. K. Fuzzy-class point approach for software effort estimation using various adaptive regression methods // CSI Transactions on ICT. 2013. V. 12. (DOI 10.1007).
8. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzy TECH. С.-Пб: БХВ-Петербург, 2005. С. 736.
9. Бобырь М. В., Титов В. С., Акулишин Г. Ю. Моделирование нечетко-логических систем управления на основе мягких арифметических операций // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 3. С. 29—35.
10. Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А. Автоматическая компенсация тепловых деформаций шпиндельных узлов прецизионного оборудования с ЧПУ // Промышленные АСУ и контроллеры. 2006. № 11. С. 31—35.
11. Титов В. С., Бобырь М. В., Анциферов А. В. Адаптивный мультисетевой алгоритм нечетко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 5. С. 18—23.

12. Емельянов С. Г., Титов В. С., Бобырь М. В. Автоматизированные нечетко-логические системы управления. М.: Инфра-М, 2011. 176 с.

13. Титов В. С., Бобырь М. В., Анциферов А. В. Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 21—26.

14. Емельянов С. Г., Бобырь М. В., Анциферов А. В. Алгоритм самообучения адаптивных нейро-нечетких систем на ос-

нове мягких вычислений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 8. С. 003—009.

15. Бобырь М. В. Методы построения функций принадлежности для нечетких баз знаний // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 2. С. 27—33.

16. Титов В. С., Бобырь М. В., Тевс С. С. Выбор оптимальных параметров управления технологическим процессом методами нечеткой логики // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. № 5. С. 21—23.

M. V. Bobyr, Professor, fregat\_mn@rambler.ru, V. S. Titov, Professor, N. A. Milostnaya, lecturer, natmil@mail.ru, South-West state university, Kursk

## Prediction of Mechatronic Systems Based on Soft Fuzzy Knowledge Bases. Part 2

*When learning of fuzzy knowledge bases there is a problem associated with a decrease in the standard deviation between the values that are generated at the output of inference engine, and the data obtained from the training set of experimental data. For a learning sample is usually used means of multivariate regression analysis. This problem is particularly acute because the exact methods are not always able to provide sufficient performance due to the vagueness and uncertainty of the initial information. Way out of this situation is to use data mining techniques, on the theory of fuzzy sets. Note that when predicting multivariate regression equations allow only linear correlations between input and output parameters of mechatronic systems, while the output of fuzzy inference system formed nonlinear and linear dependence, the receipt of which is possible after training. Discussed in the article teaching methods soft fuzzy knowledge bases provide an opportunity to assess the effectiveness of the proposed solutions to minimize the standard deviation.*

**Keywords:** fuzzy-logic inference, fuzzy knowledge base, adaptation, prediction, soft computing, modified algorithm fuzzy-logic inference, regression, additivity, root mean square error

### References

1. Kumanan S., Jesuthanam C. P., Kumar R. A. Application of multiple regression and adaptive neuro fuzzy inference system for the prediction of surface roughness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. V. 35. Iss. 7—8. P. 778—788.

2. Karakus M., Tutmez B. Fuzzy and Multiple Regression modelling for Evaluation of Intact Rock Strength Based on Point Load, Schmidt Hammer and Sonic Velocity. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2006. V. 39. Iss. 1. P. 45—57.

3. Saeidi O., Torabi S. R., Ataei M. Prediction of the Rock Mass Diggability Index by Using Fuzzy Clustering-Based, ANN and Multiple Regression Method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014. V. 47. Iss. 2. P. 717—732 (DOI 10.1007).

4. Bodin O. N., Polosin V. G., Balakhonova S. A. Razrabotka i issledovanie modeli vosstanovleniya miokarda dlya prognozirovaniya AV blokad. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2013. N. 12. P. 59—64.

5. Rotshteyn A. P., Shtovba S. D. Modelirovanie nadezhnosti cheloveka-operatora s pomoshch'yu nechetkoy bazy znaniy Sugeno. *Avtomatika i telemekhanika*. 2009. N. 1. P. 180—187.

6. Khan U. T., Valeo C., He J. Non-linear fuzzy-set based uncertainty propagation for improved DO prediction using multiple-linear regression // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2013. V. 27. Iss. 3. P. 599—616.

7. Satapathy S. M., Kumar M., Rath S. K. Fuzzy-class point approach for software effort estimation using various adaptive regression methods. *CSI Transactions on ICT*. 2013. V. 12. (DOI 10.1007).

8. Leonenkov A. V. Nечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzy TECH. S.-Pb: BKhV-Peterburg, 2005. P. 736.

9. Bobyr' M. V., Titov V. S., Akul'shin G. Yu. Modelirovanie nechetko-logicheskikh sistem upravleniya na osnove myagkikh arifmeticheskikh operatsiy. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy*. 2013. N. 3. P. 29—35.

10. Titov V. S., Bobyr' M. V., Milostnaya N. A. Avtomaticheskaya kompensatsiya teplovykh deformatsiy shpindel'nykh uzlov pretzionnogo oborudovaniya s ChPU. *Promyshlennye ASU i kontrolyery*. 2006. N. 11. P. 31—35.

11. Titov V. S., Bobyr' M. V., Antsiferov A. V. Adaptivnyy mul'tisetevoy algoritm nechetko-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravleniya oborudovaniem s ChPU. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2013. N. 5. P. 18—23.

12. Emel'yanov S. G., Titov V. S., Bobyr' M. V. Avtomatizirovannyye nechetko-logicheskie sistemy upravleniya. M.: Infra-M, 2011. 176 p.

13. Titov V. S., Bobyr' M. V., Antsiferov A. V. Algoritm vysokoskorostnoy obrabotki detaley na osnove nechetkoy logiki. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2012. N. 6. P. 21—26.

14. Emel'yanov S. G., Bobyr' M. V., Antsiferov A. V. Algoritm samoobucheniya adaptivnykh neyro-nechetkikh sistem na osnove myagkikh vychisleniy. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*. 2013. Iss. 11. N. 8. P. 003—009.

15. Bobyr' M. V. Metody postroeniya funktsiy prinadlezhnostey dlya nechetkikh baz znaniy. *Promyshlennye ASU i kontrolyery*. 2011. N. 2. P. 27—33.

16. Titov V. S., Bobyr' M. V., Tevs S. S. Vybor optimal'nykh parametrov upravleniya tekhnologicheskim protsessom metodami nechetkoy logiki. *Promyshlennye ASU i kontrolyery*. 2003. N. 5. P. 21—23.

УДК 681.5

**К. С. Шоланов**, д-р техн. наук, проф., sholkor@rambler.ru,  
Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева

## Синтез кинематической схемы и решение задачи позиционирования нового параллельного манипулятора

*В целях совершенствования функциональных возможностей платформенных роботов предлагается новая конструкция параллельного манипулятора. Кинематическая схема параллельного манипулятора построена исходя из подобия пятимерному симплексу. Получено в явном виде аналитическое решение прямой задачи кинематики о положениях. Приведены результаты компьютерного моделирования пространственного перемещения подвижной платформы с применением MATLAB.*

**Ключевые слова:** параллельный манипулятор, робот платформенного типа, кинематическая схема, прямая задача кинематики

### Введение

В настоящее время в различных областях находят применение роботы платформенного типа со строением, подобным платформе Стюарта [1]. Преимущество этих роботов общеизвестны. Однако в большинстве роботов платформенного типа с числом степеней свободы более трех изменяемые координаты подвижной платформы связаны между собой так, что перемещение в любом приводе требует одновременного, согласованного перемещения в других приводах платформы. Для манипуляторов таких роботов не существует в явном виде решения прямой задачи кинематики [2]. В связи с этими возникают проблемы при создании систем управления, а также при эксплуатации, так как отказ одного привода ведет к нарушению работоспособности всего робота.

В целях улучшения функциональных возможностей роботов платформенного типа предлагается новая кинематическая схема параллельного манипулятора, обеспечивающая возможность независимого управления приводами платформы. Дано обоснование преимуществ нового параллельного манипулятора; применением матричных методов преобразования в явном виде решена прямая задача кинематики о положениях.

### Обоснование предлагаемой кинематической схемы манипулятора платформенного робота

Платформенный манипулятор представляет собой две платформы, соединенные связями, допускающими линейное перемещение. Кинематическая схема такого манипулятора, рассматриваемого ниже, получена из симплекса, представленного на рис. 1.

Остановимся на описании симплекса с применением комбинаторной топологии [3, 4]. Пусть на множестве возможных перемещений механической системы  $X$  введена топология  $\tau$  и задано топологическое пространство  $T_0 = (X, \tau)$ . Множества  $A$  и  $B$ , образованные из точек  $a$  и  $b$  положений двух со-

единенных тел при возможном перемещении системы, допускаемом связями, являются, в свою очередь, также топологическими пространствами, представленными, соответственно, в виде симплексов  $A^r, B^s$  (верхние индексы обозначают размерность симплекса). Тогда топологическое пространство  $T_0$  можно определить как прямое топологическое произведение этих пространств и представить в виде симплекса  $C^n$ , равного комбинаторной сумме двух симплексов  $C^n = A^r + B^s$ , причем  $n = r + s + 1$ . Сравнением кинематических свойств двух взаимосвязанных элементов механической системы установлено, что число ребер, соединяющих смежные вершины симплексов  $A^r, B^s$  при построении симплекса  $C^n$ , равно числу независимых параметров, определяющих взаимное положение тел, множество положений которых представляют симплексы.

В работе [4] доказано, что множество положений взаимосвязанных тел механизма при возможном перемещении системы представляет собой топологическое пространство  $T$  (симплекс  $C^n$ ), являющееся подмножеством  $T_0$ . При построении симплекса  $C^n$  (рис. 1) смежность вершин  $A^r$  и  $B^s$  устанавливается исходя из условия, чтобы полученный

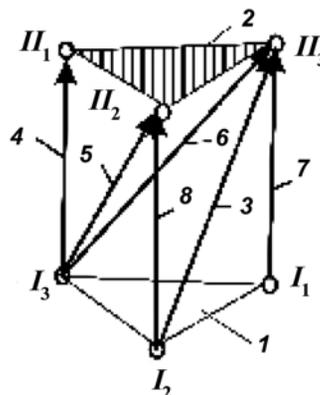


Рис. 1. Пятимерный симплекс двух взаимосвязанных тел

суммарный симплекс  $C^n$  был правильным и ориентированным. Симплициальный комплекс  $C^n$  имеет шесть направленных ребер (3, ..., 8) соединяющих смежные вершины противоположных двумерных симплексов  $A_2$  (1) и  $B_2$  (2). Пятимерный симплекс  $C^5$  представляет топологическую модель взаимосвязанных тел, имеющих шесть степеней свободы друг относительно друга. Указанный симплекс принят за основу при синтезе кинематической схемы манипулятора с шестью степенями свободы, представленного на рис. 2, а.

Здесь показаны соединительные звенья 3, ..., 8, которые с помощью многозвенных сферических соединений соединяются с нижней (1) и верхней (2) платформами. Многозвенные соединения (выделены на рис. 2, а) в узлах  $C_1$  и  $C_2$  представляют сферические соединения из четырех звеньев, а в узлах  $B_1, B_2$  — сферические соединения из трех звеньев [5]. Синтезированная кинематическая схема с использованием четырех- и трехзвенных сферических соединений реализована в виде конструкции манипулятора платформенного типа (рис. 2, б) [6]. Здесь в качестве соединительных звеньев, установленных между нижней (1) и верхней (2) платформами, используются односторонние гидроприводы, управляемые от гидроузла 9 (рис. 2, б). Конструкция манипулятора платформенного типа SHOLKOR дает возможность реально продемонстрировать его уникальные свойства, обусловленные особенностями кинематической схемы.

Во-первых, шесть приводов, расположенных на соединительных звеньях, при независимом друг от друга управлении обеспечивают шесть степеней свободы одной платформы относительно другой. Во-вторых, существенно упрощается задача управления. Так, например, перемещение платформы 2 относительно платформы 1 может выполняться путем позиционирования в пространстве некоторой прямой  $B_2C_2$ . При этом вначале в заданную точку пространства перемещается узел  $C_2$  путем изменения длин соединительных звеньев 3, 6, 7; затем перемещается узел  $B_2$  за счет изменения длин соединительных звеньев 5, 8. Завершается позиционирование верхней платформы относительно нижней поворотом вокруг прямой  $B_2C_2$  узла  $A_2$ , изменением длины соединительного звена 4. Из сказанного следует, что движение платформы 2 относительно платформы 1 можно разделить на три последовательных этапа: перемещение узла  $C_2$ , затем узлов  $B_2$  и  $A_2$  по отдельности или одновременно. В этой последовательности ниже выводятся необходимые кинематические соотношения.

#### Решение задачи позиционирования платформы

Для позиционного управления роботом платформенного типа и дальнейшего определения кинема-

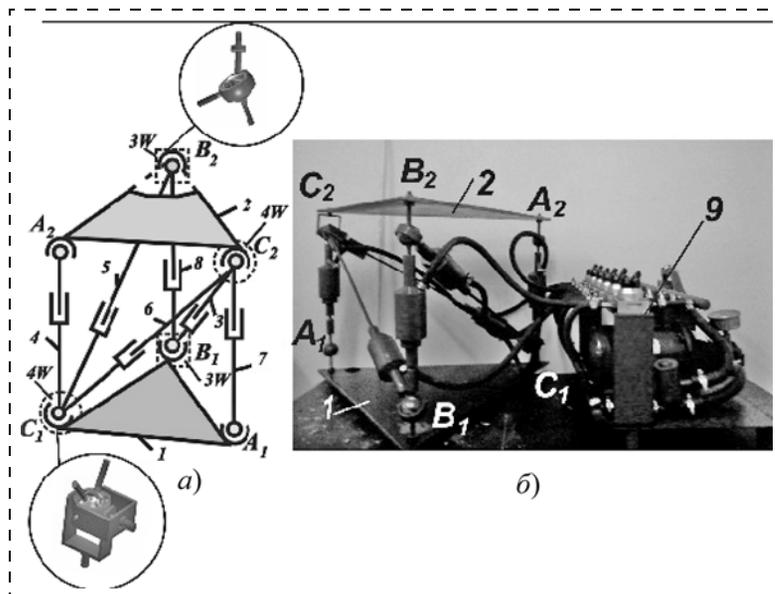


Рис. 2. Кинематическая схема (а) и конструкция манипулятора (б)

тических параметров ставится задача получить аналитические зависимости для координат трех узловых точек  $C_2, B_2, A_2$ , определяющих положение подвижной платформы 2 относительно системы координат, связанной с неподвижной платформой 1 (рис. 2, а). В рассматриваемой задаче переменными являются длины шести соединительных звеньев  $l_i$  ( $i = 3, \dots, 8$ ), причем в качестве платформ 1 и 2 приняты правильные треугольники со стороной, равной  $a$ .

Для определения положения узла  $C_2$  верхней платформы рассматривается базовая пирамида  $C_2A_1B_1C_1$  (рис. 3, а). Начало базовой системы координат  $C_1X_1Y_1Z_1$ , связанной с платформой 1, выбирается в узле  $C_1$ . Ось  $C_1X_1$  направляется по стороне  $A_1C_1$  треугольника  $A_1B_1C_1$  от  $C_1$  к  $A_1$ . Ось  $C_1Z_1$  направляется перпендикулярно плоскости треугольника  $A_1B_1C_1$ .

В дальнейшем, для описания преобразования систем координат с помощью однородных матриц преобразования используется метод восьми параметров [7] ввиду его универсальности. При форми-

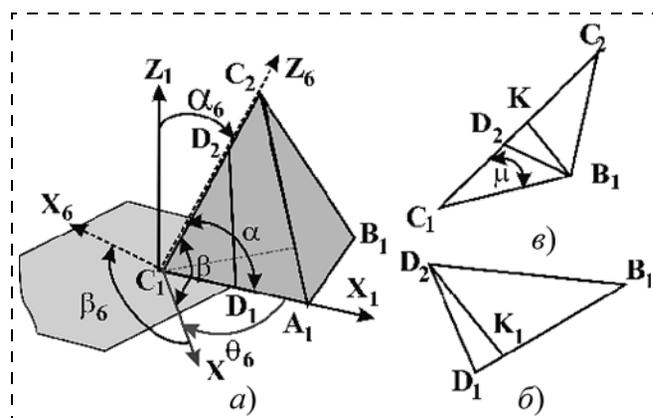


Рис. 3. Базовая пирамида и параметры преобразования по звену 6

ровании матриц преобразования и действиях с ними применяется MathCAD. Узел  $C_2$  как точка в пространстве имеет три степени свободы, а его положение зависит от длин соединительных звеньев 3, 6, 7. Чтобы получить зависимости для определения координат узла  $C_2$ , в рассматриваемой пирамиде выполняем последовательно преобразования систем координат через три цепи  $C_1-C_2$ ,  $C_1-B_1-C_2$ ,  $C_1-A_1-C_2$ .

Решение задачи начинается с преобразования подвижной системы координат  $C_1X_6Y_6Z_6$ , связанной с соединительным звеном 6, в базовую систему координат  $C_1X_1Y_1Z_1$  по цепи  $C_1-C_2$ . Это преобразование рассмотрим более подробно. В дальнейшем, чтобы не повторять несложные геометрические расчеты, будут показаны конечные выкладки и некоторые особенности, которые имели место. Рассматриваемое преобразование (рис. 3) реализуется рядом последовательных движений системы  $C_1X_1Y_1Z_1$  до полного совпадения с системой координат  $C_1X_6Y_6Z_6$ . Первым действием будет поворот системы  $O_1X_1Y_1Z_1$  на угол  $\theta_6$  вокруг оси  $C_1Z_1$  до тех пор, пока ось  $C_1X_1$  не расположится в плоскости основания перпендикулярно к оси  $C_1Z_6$  ( $\beta = \pi/2$ ). Промежуточное положение оси  $C_1X_1$  обозначено  $C_1X$ . Поверхность  $C_2A_1C_1$  образует с плоскостью  $C_1X_1Y_1$  основания двугранный угол  $\angle C$ . Согласно теореме косинусов трехгранного угла с вершиной  $C_1$  имеем  $\cos\beta = \cos\alpha\cos\theta_6 + \sin\alpha\sin\theta_6 \cdot \cos(\pi - C)$ . Так как  $\beta = \pi/2$ , после упрощения получим  $\text{ctg}\theta_6 = \text{tg}\alpha\cos C$ . Здесь  $\alpha$  — угол при основании треугольной грани  $A_1C_1C_2$ , равный  $\alpha = \arcsin(H/l_6)$ ,  $H$  — высота, опущенная из вершины  $C_2$  на основание  $A_1C_1$ . Двугранный угол  $\angle C$  равен линейному углу между перпендикуляром  $D_1D_2$ , восстановленным из середины стороны треугольника  $A_1C_1$  и высотой треугольника  $A_1C_1B_1$ . При изменении конфигурации манипулятора положение точки  $D_2$  изменяется. При этом возможны четыре случая в зависимости от конфигураций грани  $A_1C_1C_2$ , которым соответствуют различные значения угла  $\alpha$ , а именно:

- 1)  $\alpha < \pi/2$  и  $l_6\cos\alpha > a/2$ ;
- 2)  $\alpha < \pi/2$  и  $l_6\cos\alpha = a/2$ ;
- 3)  $\alpha = \pi/2$ ;
- 4)  $\alpha > \pi/2$ .

Полагаем, что значение угла  $\alpha$  удовлетворяет первому условию. Определим  $D_1D_2 = f = \frac{a}{2} \text{tg}\alpha$ .

Двугранный угол  $\angle C$  равен линейному углу  $D_2D_1B_1$ , т. е.  $\angle C = \arcsin(D_2K_1/f)$ , где  $D_2K_1$  — отрезок, полученный в результате построения, когда из точки  $D_2$  опускается перпендикуляр на прямую  $B_1D_1$  (рис. 3, б). Теперь может быть получено выражение для угла  $\theta_6$  в виде

$$\theta_6 = \arctg\{1/[\text{tg}\alpha\cos C]\}. \quad (1)$$

В трех других трех случаях переменные определяются по аналогичным выражениям, затем для каждого случая  $\theta_6$  находится по формуле (1).

Следует отметить, что опустив перпендикуляр  $B_1K$  на прямую  $C_1C_2$  (рис. 3, в) и определив его по известным сторонам треугольника, можно найти угол  $\mu$  по формуле  $\sin\mu = \frac{B_1K}{a}$ . Этот угол используется ниже.

Возвращаясь к последовательности преобразования систем координат, отметим, что следующее преобразование представляет вращение системы  $C_1XYZ$  на угол  $\alpha_6$  вокруг оси  $C_1X$  до такого положения, пока оси  $C_1Z$  и ось  $C_1Z_6$  не совпадут. Для окончательного совмещения систем координат выполняется поворот вокруг оси  $C_1Z_1$  на угол  $\beta_6$  до тех пор, пока не совпадут оси  $C_1X$  и  $C_1X_6$ . Данный угол обеспечивает избыточную степень подвижности, его значение не влияет на конфигурацию манипулятора. По этой причине ниже везде принимается, что все углы вращения вокруг собственных осей звеньев равны нулю ( $\beta_i = 0$ ). В результате преобразований установлены элементы однородной матрицы преобразования  $A_6^0$ , определяющей положение системы координат, связанной с шестым звеном, относительно базовой системы координат.

Далее положение того же узла  $C_2$  определяется преобразованием систем координат по цепи  $C_1-B_1-C_2$ . Теперь выбирается подвижная система координат  $B_1X_3Y_3Z_3$ , связанная с соединительным звеном 3 (рис. 4). Ось  $B_1Z_3$  направляется по ребру  $B_1C_2$ , ось  $B_1X_3$  — перпендикулярно плоскости грани  $B_1C_1C_2$ . Для определения параметров преобразования при перемещении базовой системы  $C_1X_1Y_1Z_1$  до совмещения с системой координат  $B_1X_3Y_3Z_3$  выполним следующие действия:

1) повернем систему координат  $C_1X_1Y_1Z_1$  вокруг оси  $C_1Z_1$  на угол  $\theta = \pi/3$ , пока ось  $C_1X$  не будет направлена по стороне  $B_1C_1$ ;

2) выполним параллельный перенос системы из точки  $C_1$  в  $B_1$  по оси  $B_1X$  на величину  $a$ , новое положение системы координат обозначим  $B_1XYZ$ .

Приведенные действия описываются однородной матрицей преобразования  $A_{03}^0$ . Следующее движение — поворот системы  $B_1XYZ$  относительно

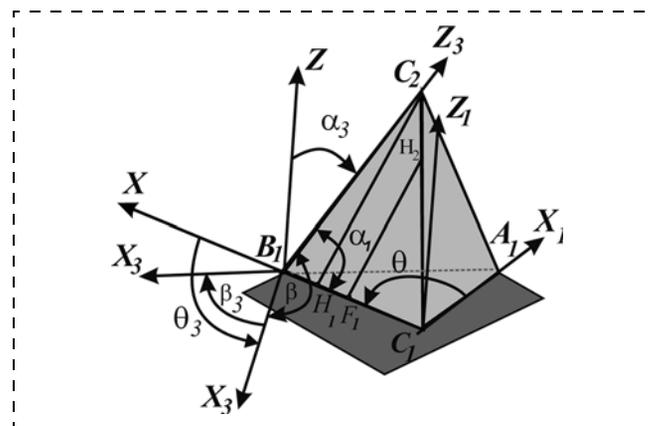


Рис. 4. Параметры при преобразовании через звено 3

оси  $B_1Z$  на угол  $\theta_3$  пока ось  $B_1X$  не расположится в плоскости основания перпендикулярно грани  $B_1C_2$  ( $\beta = \pi/2$ ) и не займет положение  $B_1X_{03}$ . Затем выполняется поворот относительно оси  $B_1X_{03}$  на угол  $\alpha_3$ , пока ось  $B_1Z$  не совпадет с осью  $B_1Z_3$ ; для совмещения осей  $X$  выполняется поворот вокруг оси  $B_1Z_3$  на угол  $\beta_3$ . Это преобразование описывается матрицей  $A_3^{03}$ . Чтобы установить элементы матрицы  $A_3^{03}$ , повторим рассуждения, подобные приведенным выше, а именно: находим угол  $\theta_3$  по зависимости  $\theta_3 = -\arctg[\tg\alpha_1 \cos B]$ , где  $\alpha_1$  — угол при основании грани  $C_1B_1C_2$ .

Чтобы определить двухгранный угол  $\angle B$  между основанием и гранью  $C_1B_1C_2$ , выполняется ряд построений. Пусть  $H_2$  — точка пересечения перпендикуляра, восстановленного из точки  $F_1$  — середины стороны  $B_1C_1$  со стороной  $C_1C_2$ . Двухгранный угол  $\angle B$  равен плоскому углу  $\angle H_2F_1A_1$ . Алгоритм определения двухгранного угла  $\angle B$  зависит от конфигурации грани, и в каждом случае выбирается в зависимости от условий:

- 1)  $\alpha_1 < \pi/2$  и  $a/2 < l_3 \cos \alpha_1 < a$ ;
- 2)  $\alpha_1 < \pi/2$  и  $l_3 \cos \alpha_1 = a/2$ ;
- 3)  $\alpha_1 = \pi/2$ ;
- 4)  $\alpha_1 > \pi/2$ .

Рассмотрим решение задачи в случае 1. Искомый угол  $\angle B$  определяется из треугольника  $A_1F_1H_2$ , т. е.  $\angle B = \arcsin(H/s)$ , в котором  $p = (a\sqrt{3}/2 + f + s)/2$ ,  $H = \frac{2}{a\sqrt{3}/2} |\sqrt{p(p - a\sqrt{3}/2)(p - f)(p - s)}|$ ,  $B_1H_2 = r = \frac{a}{2\cos\alpha_1}$ ,  $F_1H_2 = f = |\sqrt{r^2 - a^2/4}|$ ,  $s = A_1H_2$ . Ана-

логично определяется значение угла  $\angle B$  и в других трех случаях, затем определяется угол  $\theta_3$ . Тем самым, определены элементы матрицы преобразования  $A_3^{03}$ .

Для того, чтобы получить выражения матриц при преобразованиях по цепи  $C_1-A_1$  и  $A_1-C_2$ , свяжем со звеном 7 подвижную систему координат  $A_1X_7Y_7Z_7$ . Направим ось  $A_1Z_7$  вдоль ребра  $A_1C_2$ , ось  $A_1X_7$  — перпендикулярно плоскости грани  $A_1C_1C_2$  (рис. 5).

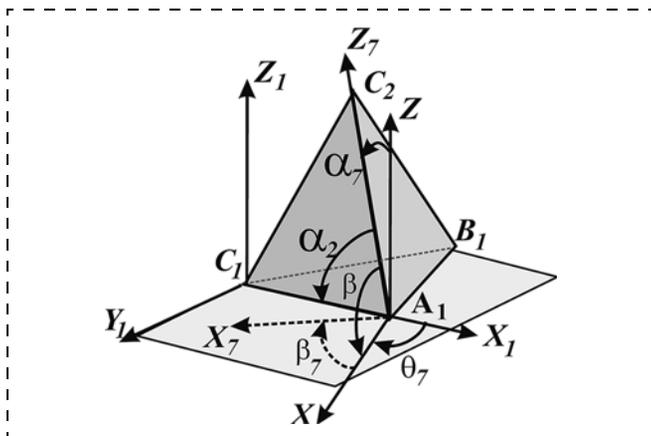


Рис. 5. Параметры преобразования по звену 7

Выполним следующую последовательность движений для совмещения базовой системы координат с системой  $A_1X_7Y_7Z_7$ : параллельный перенос системы  $C_1X_1Y_1Z_1$  вдоль оси  $C_1X_1$  на величину  $a_7 = a$  (новое положение базовой системы обозначено  $A_1X_1Y_1Z_1$ ). Это преобразование описывается матрицей  $A_7^0$ . Далее выполняется: поворот на угол  $\theta_7$  относительно оси  $A_1Z$ , пока ось  $A_1X_1$  не займет положение  $A_1X$ , перпендикулярное  $A_1Z_7$ ; поворот вокруг оси  $A_1X$  на угол  $\alpha_7$ , пока оси координат  $A_1Z$  и  $A_1Z_7$  не совпадут; поворот на угол  $\beta_7$  вокруг оси  $A_1Z_7$  до совпадения осей  $A_1X$  и  $A_1X_7$ . Эти преобразования описываются матрицей  $A_7^{07}$ . Определим элементы матрицы  $A_7^{07}$ . Угол  $\theta_7$  является смежным углом одного из углов трехгранного угла при вершине  $A_1$  и определяется, как и выше, по зависимости  $\ctg\theta_7 = -\tg\alpha_2 \cos A$ . Здесь  $\alpha_2$  — угол при основании треугольника  $A_1C_1C_2$ . В равенстве для  $\theta_7$  двухгранный угол  $A$  равен двухгранному углу  $C$ .

На основе приведенных выше преобразований через три цепи  $C_1-C_2$ ,  $C_1-B_1-C_2$ ,  $C_1-A_1-C_2$  получены матрицы преобразований  $A_6^0$ ,  $A_{03}^0$ ,  $A_3^{03}$ ,  $A_{07}^0$ ,  $A_7^{07}$  и выражения для определения радиус-вектора  $r_{C_2}^0 = (x_{C_2} \ y_{C_2} \ z_{C_2} \ 1)^T$ , составленного из координат узла  $C_2$  в виде

$$\begin{aligned} r_{C_2}^0 &= A_6^0 r_6, \quad r_6 = (0 \ 0 \ l_6 + h_6 \ 1)^T; \\ r_{C_2}^0 &= A_{03}^0 A_3^{03} r_3, \quad r_3 = (0 \ 0 \ l_3 + h_3 \ 1)^T; \\ r_{C_2}^0 &= A_{07}^0 A_7^{07} r_7, \quad r_7 = (0 \ 0 \ l_7 + h_7 \ 1)^T. \end{aligned} \quad (2)$$

Совместным решением матричных равенств (2) получены искомые координаты точки  $C_2$  и углы  $\alpha_3$ ,  $\alpha_6$ ,  $\alpha_7$  между осями соединительных звеньев 3, 6, 7 и осью  $C_1Z_1$  в виде

$$\begin{aligned} \alpha_7 &= \arcsin\left(\frac{Ba}{FB - GA}\right); \\ x_C &= a - F \frac{Ba}{FB - GA}; \quad y_C = -G \frac{Ba}{FB - GA}; \\ z_C &= l_7 \cos \alpha_7; \quad \alpha_6 = \arcsin\left(\frac{x_C}{A}\right); \quad \alpha_3 = \arccos\left(\frac{z_C}{l_3}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь введены вспомогательные переменные

$$A = l_6 \sin \theta_6, \quad B = l_6 \cos \theta_6, \quad F = l_7 \sin \theta_7, \quad G = l_7 \cos \theta_7.$$

Положение узла  $B_2$  определяется путем преобразования систем координат через две кинематические цепи  $C_1-B_2$  и  $C_1-B_1-B_2$ . Определим положение узла  $B_2$ , выполнив следующие преобразования по цепи  $C_1-B_2$  (рис. 6). Эти преобразования описываются матрицей  $A_5^0$ . Для того, чтобы определить элементы матрицы  $A_5^0$ , рассмотрим трехгранный угол с вершиной в точке  $C_1$  и гранями  $C_1a$ ,  $C_1b$ ,  $C_1c$ . Плоский угол  $aC_1c$  обозначен  $\beta$ , а обозначения других плоских углов показаны на рис. 6.

Выражение для угла  $\theta_5$  имеет вид  $\theta_5 = \text{arctg}(-\text{tg}\alpha_8 \cos C_1) - \pi/3$ . При этом угол при основании треугольной грани  $C_1B_1B_2$  равен  $\alpha_8 = \text{arcsin}(H/l_5)$ , где  $H$  — высота и  $p$  — полупериметр  $\Delta C_1B_1B_2$ :

$$H = \frac{2}{a} |\sqrt{p(p-a)(p-l_5)(p-l_8)}|, p = (a + l_5 + l_8)/2.$$

Двухгранный угол  $\angle C_1$  образован поверхностью  $C_1B_2B_1$  с плоскостью  $C_1X_1Y_1$  основания. Этот угол можно рассматривать как сумму двухгранного угла  $\angle C$  и двухгранного угла  $\angle C_2$  между поверхностями  $C_1B_1B_2$  и  $C_1B_1C_2$ . Угол  $\angle C_2$  определяется с помощью теоремы косинусов для трехгранного угла с вершиной в точке  $C_1$  и плоскими углами  $\angle \alpha_8, \angle \mu, \angle \varphi =$

$$= \angle B_2C_1C_2, \text{ т. е. } \angle C_2 = \arccos\left(\frac{-\cos\alpha_8 \cos\mu + \cos\varphi}{\sin\alpha_8 \sin\mu}\right).$$

Угол  $\varphi$  определяется из треугольника  $C_1B_2C_2$ , т. е.  $\varphi = \text{arcsin}(H/l_6)$ , где  $p = (a + l_5 + l_6)/2$ ,  $H = \frac{2}{l_5} |\sqrt{p(p-a)(p-l_5)(p-l_8)}|$ . Угол  $\mu$  определяется,

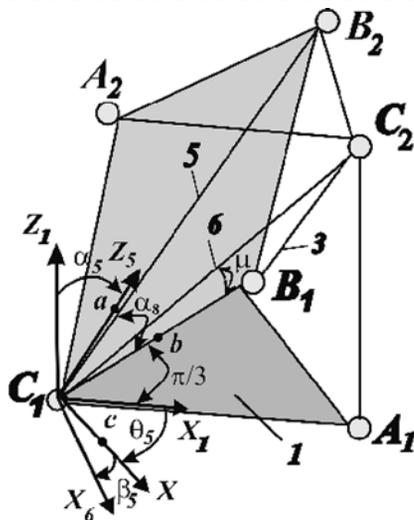


Рис. 6. Преобразование систем координат по цепи  $C_1-B_2$

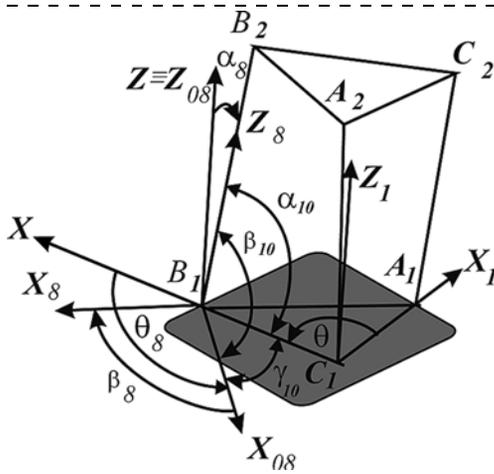


Рис. 7. Преобразование по цепи  $C_1-B_1-B_2$

как указано выше, из треугольника, приведенного на рис. 3, в.

Для преобразования систем координат по цепи  $C_1-B_1-B_2$  выбирается система координат  $B_1X_8Z_8$ , связанная со звеном 8 таким образом, что ось  $B_1Z_8$  направляется по звену 8, а ось  $B_1X_8$  располагается в плоскости грани  $A_1B_1B_2$  (рис. 7). Затем выполняется следующая последовательность действий для совмещения базовой системы координат с подвижной системой, связанной со звеном 8:

1) поворот системы  $C_1X_1Z_1$  вокруг оси  $C_1Z_1$  на угол  $\theta = \pi/3$ , пока направление оси  $X$  не совпадет со стороной  $C_1B_1$ ;

2) перенос вдоль  $C_1B_1$  на расстояние  $a$ . Новое положение системы координат будет  $B_1XZ$ .

Эти действия описываются матрицей преобразования  $A_{08}^0$ . Последующие преобразования описываются матрицей  $A_8^{08}$ .

Элементы этой матрицы определяются аналогично по алгоритму, приведенному выше. При этом угол  $\theta_8$  находят из выражения для косинуса трехгранного угла с вершиной  $B_1$ , образованного плоскостями с плоскими углами  $\alpha_{10}, \beta_{10}, \gamma_{10}$  (рис. 7) по зависимости  $\text{ctg}\theta_8 = \text{tg}\alpha_{10} \cos B_1$ . Здесь угол  $\angle B_1$  образован поверхностью  $C_1B_2B_1$  с плоскостью  $C_1X_1Y_1$  и равен  $\angle C_1$ . Угол  $\alpha_{10}$  при основании  $\Delta C_1B_1B_2$  следует из равенства  $\alpha_{10} = \text{arcsin}(H/l_8)$ , в котором  $p = (a + l_5 + l_8)/2$ ,  $H = \frac{2}{a} |\sqrt{p(p-a)(p-l_5)(p-l_8)}|$ .

Радиус-вектор, составленный из координат узла  $B_2$ , определяется матричными равенствами, в которых формирование матриц  $A_5^0, A_{08}^0, A_8^{08}$  и действия с ними выполняются в MatCAD:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{B_2}^0 &= A_5^0 \mathbf{r}_5, \mathbf{r}_5 = (0 \ 0 \ l_5 + h_5 \ 1)^T; \\ \mathbf{r}_{B_2}^0 &= A_{08}^0 A_8^{08} \mathbf{r}_8, \mathbf{r}_8 = (0 \ 0 \ l_8 + h_8 \ 1)^T. \end{aligned} \quad (4)$$

Так как точка  $B_2$  располагается на поверхности шара с радиусом  $a$  с центром в точке  $C_2$ , то дополнительно к (4) используется уравнение сферы в виде

$$(x_{C_2} - x_{B_2})^2 + (y_{C_2} - y_{B_2})^2 + (z_{C_2} - z_{B_2})^2 - a^2 = 0. \quad (5)$$

В результате совместного решения уравнений (4), (5) получены искомые координаты узла  $B_2$  и углы между осями звеньев 5, 8 и осью  $C_1Z_1$ :

$$\alpha_8 = \text{arcsin}\left[\frac{a(A1\sqrt{3} - B1)}{A1 \cdot D1 + B1 \cdot C1}\right]; z_{B_2} = (h_8 + l_8) \cos \alpha_8;$$

$$\begin{aligned} (x_{B_2})_{1,2} &= \frac{-P \pm \sqrt{P^2 - U1(1+k^2)}}{1+k^2}, \\ y_{B_2} &= \frac{B1x_{B_2}}{A1}, \alpha_5 = \text{arcsin}\left(\frac{x_{B_2}}{A1}\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$A1 = \sin\theta_5 l_5, B1 = -\cos\theta_5 l_5,$$

$$C1 = [\sin(\theta_8 + \sqrt{3} \cos\theta_8)] l_8,$$

$$D1 = [\cos\theta_8 - \sqrt{3} \sin\theta_8] l_8,$$

$$U = \left\{ z_{C_2} - l_8 \cos \left[ \frac{a(A1\sqrt{3} - B1)}{A1 \cdot D1 + B1 \cdot C1} \right] \right\}^2 - a^2,$$

$$k = B1/A1, P = x_{C_2} + 2y_{C_2} k,$$

$$U1 = U + x_{C_2}^2 + y_{C_2}^2.$$

Для того, чтобы определить положение узла  $A_2$  в системе координат  $C_1 X_1 Y_1 Z_1$ , принимаем во внимание то обстоятельство, что в любой момент времени точка  $A_2$  (см. рис. 2) находится на пересечении трех сферических поверхностей с центрами в точках  $B_2, C_2$  и радиусами, равными  $a$ , а также поверхностью с центром в точке  $C_1$  радиусом  $l_4$ . Поэтому координаты узла  $A_2$  должны удовлетворять следующим трем уравнениям:

$$(x_{A_2} - x_{B_2})^2 + (y_{A_2} - y_{B_2})^2 + (z_{A_2} - z_{B_2})^2 - a^2 = 0; \quad (7)$$

$$(x_{C_2} - x_{A_2})^2 + (y_{C_2} - y_{A_2})^2 + (z_{C_2} - z_{A_2})^2 - a^2 = 0;$$

$$x_{A_2}^2 + y_{A_2}^2 + z_{A_2}^2 - l_4^2 = 0.$$

После совместного решения системы уравнений (7) получены координаты  $A_2$ :

$$\begin{aligned} (z_{A_2})_{1,2} &= \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha}, \\ x_{A_2} &= \frac{1/2(\varepsilon y_{C_2} - \eta y_{B_2}) + (z_{C_2} y_{B_2} - z_{B_2} y_{C_2}) z_{A_2}}{x_{B_2} y_{C_2} - x_{C_2} y_{B_2}}, \\ y_{A_2} &= \frac{1/2(\eta x_{B_2} - \varepsilon x_{C_2}) + (z_{B_2} x_{C_2} - z_{C_2} x_{B_2}) z_{A_2}}{x_{B_2} y_{C_2} - x_{C_2} y_{B_2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

В равенстве (8) приняты следующие обозначения:

$$\varepsilon = (l_5)^2 - a^2 + (l_4)^2; \quad \eta = (l_6)^2 - a^2 + (l_4)^2;$$

$$\alpha = A z_{B_2}^2 + B z_{C_2}^2 - 2C z_{B_2} z_{C_2} + D;$$

$$\beta = -\varepsilon A z_{B_2} - \eta B z_{C_2} + \eta C z_{B_2} + \varepsilon C z_{B_2};$$

$$\gamma = A\varepsilon^2/4 + B\eta^2/4 - C\varepsilon\eta/2 - (x_{B_2} y_{C_2} - x_{C_2} y_{B_2})^2 (l_4)^2;$$

$$A = y_{C_2}^2 + x_{C_2}^2; \quad B = y_{B_2}^2 + x_{B_2}^2;$$

$$C = y_{C_2} y_{B_2} + x_{C_2} x_{B_2}; \quad D = y_{C_2} x_{B_2} - x_{C_2} y_{B_2}.$$

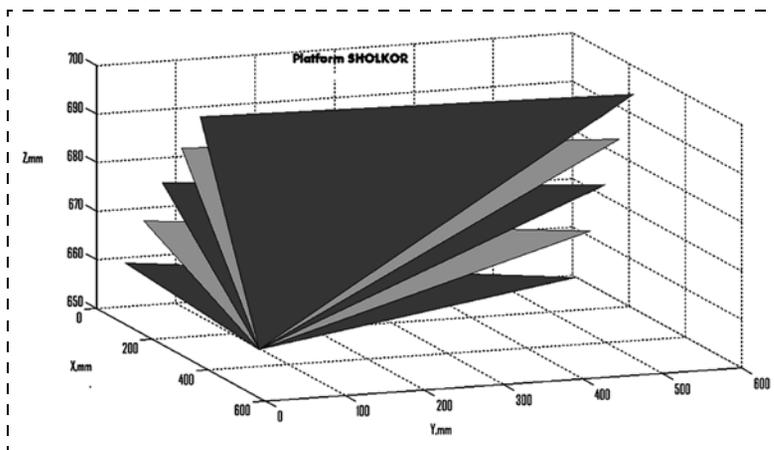


Рис. 8. Сферическое перемещение платформы

На основании полученных выше зависимостей сформирован алгоритм и составлена программа в MATLAB, позволяющая по изменению длин каждого соединительного звена определять положение узловых точек верхней платформы относительно нижней. При этом в качестве исходных данных приняты геометрические размеры существующего манипулятора. Приращения длин соединительных звеньев в каждом приводе могут задаваться независимо от других и могут изменяться по определенной закономерности. Результаты расчетов совпадают с действительными перемещениями в приводах на манипуляторе. В качестве иллюстрационного примера на рис. 8 приведен график сферического перемещения платформы при неподвижной точке  $C_2$ .

Сферическое движение выполняется тремя приводами поступательного движения, что демонстрирует новые возможности параллельного манипулятора.

Анализ кинематических возможностей манипулятора, проведенный в результате компьютерного моделирования и на реальной конструкции, свидетельствуют о следующем:

- перемещение, выполняемое отдельно взятым приводом, позволяет перемещать узловую точку по некоторой цилиндрической поверхности, кривизна которой зависит от длин двух других звеньев, соединяющихся в данном узле;
- уменьшение длин сторон треугольников, образованных узловыми точками, ведет к уменьшению кривизны цилиндрической поверхности, представляющей множество положений узловых точек;
- выбором законов изменения длин соединительных звеньев можно с помощью представленной программы получить любое заданное движение платформы.

### Заключение

На основе топологической модели двух взаимосвязанных тел (пятимерного симплекса) создана

кинематическая схема нового шестиподвижного параллельного манипулятора платформенного типа.

Синтезированная кинематическая схема с использованием трех- и четырехзвенных сферических соединений реализована в виде конструкции манипулятора платформенного типа с управляемыми гидроприводами. На этой конструкции продемонстрирован и подтвержден ряд уникальных свойств и преимуществ нового параллельного манипулятора, а именно: шесть приводов, расположенных на соединительных звеньях, могут двигаться по отдельности независимо друг от друга и обеспечивают шесть степеней свободы платформы; позиционирование в заданное положение платформы может выполняться путем позиционирования в пространстве некоторой прямой  $B_2C_2$  и последующим позиционированием узла  $A_2$  (см. рис. 2).

В явном виде получено аналитическое решение прямой задачи кинематики о положении, которое стало возможным благодаря особенностям строения нового манипулятора платформенного типа.

Компьютерная реализация в MATLAB алгоритма решения прямой задачи кинематики о положении

подтвердило то, что при позиционировании платформы можно выполнять приращения длин соединительных звеньев независимо друг от друга или осуществлять эти перемещения в заданной совокупности одновременно.

#### Список литературы

1. Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S. The Stewart platform manipulator: a review // Mechanism and Machine Theory. 2000. V. 35. P. 15—40.
2. Merlet J. Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers, 2000. 372 p.
3. Понтрягин Л. С. Основы комбинаторной топологии. М.: Наука, 1976. 136 с.
4. Шоланов К. С. Симплициальный метод анализа и синтеза строения механизмов. Алматы: Гылым, 2000. 87 с.
5. Шоланов К. С. Многозвенное сферическое соединение (Варианты) // Инновационный патент РК № 27181, 2013. Бюл. № 7.
6. Шоланов К. С. Параллельный манипулятор платформенного типа SHOLKOR // Предварительный Патент РК № 17442, 2006. Бюл. № 6.
7. Шоланов К. С. Многоподвижные механизмы с замкнутыми кинематическими цепями. Алматы: Гылым, 1999. 149 с.

K. S. Sholanov, Prof, sholkor@rambler.ru, Kazakh National Technical University named after K. I. Satpaevy

## Synthesis of the Kinematical Scheme and Solution of the Positioning Problem for a New Parallel Manipulator

*Analysis of Stewart's platform type robots showed that these robots have several deficiencies, namely: explicit direct kinematics problem for most robots with a degree of freedom of more than three cannot be solved; drive movements are dependent on each other. The indicated circumstances complicate the management system, reduce exploitation characteristics and limit the scope of use for such robots.*

*The objective of this paper is to further improve of robots of a platform-type. As a way of effective implementation of the objectives the synthesis of the structural scheme for the robot manipulator is proposed.*

*Based on the topological model of two interconnected bodies (five-dimensional simplex) the structural scheme for a new six degree of freedom parallel manipulator of a platform type is created.*

*Synthesized kinematical scheme with use of three and four-link spherical connections is implemented in the form of the construction of a parallel manipulator with controlled hydraulic drives. The construction demonstrated and confirmed a number of unique properties and advantages of the new parallel manipulator, namely: six drives placed on the connecting links can move individually and independently from each other; positioning to a predetermined position of the platform can be done by positioning in the space of a specified line and by turning around this line.*

*Due to structural features of the new parallel manipulator the explicit analytical solution of direct kinematics problem on position was obtained.*

*Computer implementation of the algorithm in Matlab for solving of the direct kinematics problem on position confirmed that while platform positioning the incrementation of lengths of the connected links can be done independently from each other or can do these movements at a predetermined set simultaneously.*

*Thus, the paper gives the justification and the structural scheme of the parallel manipulator of a platform type is synthesized. Functionalities of the new manipulator are confirmed by the current construction. The explicit analytical solution for direct kinematics problem on position was obtained and computer implementation of the algorithm for this problem solving, which can be certainly attributed to the merits of the proposed new scheme of parallel manipulator.*

**Keywords:** parallel manipulator, robot platform type, kinematical scheme, direct kinematics problem

#### References

1. Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S. The Stewart platform manipulator: a review. *Mechanism and Machine Theory*. 2000. V. 35. P. 15—40.
2. Merlet J. Parallel Robots. Kluwer Academic Publishers, 2000. 372 p.
3. Pontryagin L. S. *Osnovy kombinatornoy topologii*. M.: Nauka, 1976. 136 p.
4. Sholanov K. S. *Simplitsial'nyy metod analiza i sinteza stroeniya mekhanizmov*. Almaty: Gylym, 2000. 87 p.
5. Sholanov K. S. *Mnogozvennoe sfericheskoe soedinenie (Varianty)*. *Innovatsionnyy patent RK № 27181*, 2013. Byul. № 7.
6. Sholanov K. S. *Parallelnyy manipulyator platformennogo tipa SHOLKOR*. *Predvaritel'nyy Patent RK № 17442*, 2006. Byul. № 6.
7. Sholanov K. S. *Mnogopodvizhnye mekhanizmy s zamknutymi kinematicheskimi tsepyami*. Almaty: Gylym, 1999. 149 p.

**Д. Б. Погосов**, аспирант, pogosov.den@yandex.ru,  
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

## Позиционно-траекторное управление с учетом требований к мощности на примере гусеничных роботов

*Рассмотрена проблема синтеза топливозаконочных регуляторов движения внедорожных транспортных средств. Разработан метод управления движением со стабилизацией мощности силовой установки, а также с ограничением мощности или скорости на требуемом уровне. Задача рассмотрена на примере гусеничного робота, построена нелинейная математическая модель его шасси, электротрансмиссии и дизельного двигателя. Предложен метод многорежимного управления. Эффективность предложенных решений подтверждена компьютерным моделированием.*

**Ключевые слова:** гусеничный робот, управление движением, позиционно-траекторное управление, требования к мощности, электротрансмиссия, минимизация энергозатрат

### Введение

Гусеничные роботы являются перспективной системой для выполнения транспортных, военных, спасательных и других задач в автоматизированном режиме. Ключевыми направлениями их развития являются повышение точности, быстродействия, уменьшение энергопотребления и увеличение функциональных возможностей.

Малая удельная и высокая собственная мощности силовых установок тяжелых машин и роботов делают задачу оптимизации энергозатрат особенно актуальной. Оптимизация энергетических затрат может быть достигнута на этапе планирования траекторий и на этапе их отработки, а именно, на координационном уровне и уровне привода. Современные методы экономии энергии сконцентрированы на решении задач планирования и задач повышения эффективности привода. Например, в работах [1–3] предложены методы планирования пути из гладких кусочно-полиномиальных кривых, кривизна которых равна или приближена к нулю. Таким образом, уменьшается необходимость придания роботу дополнительного ускорения во время движения и, следовательно, энергетических потерь. В работах [2–3] предлагается коррекция профиля скорости на участках движения, где требуется дополнительная энергия. Таким образом уменьшаются потери в электроприводе и потери, связанные с отдачей батареей дополнительной мощности. Авторами работ [2–4] предпринята попытка создать систему оптимизации, объединяющую уровни планирования и координации. Большое внимание исследователей уделено вопросам оптимизации работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС), которые преимущественно касаются повышения энергоотдачи от топлива и снижения негативных выбросов в окружающую среду.

Вместе с тем, в приведенных работах отсутствуют решения по оптимизации энергозатрат на координационном уровне, основанные на едином методологическом подходе. Кроме того, применение искусственных систем коррекции профиля скоро-

сти, построенных на интерполяторах, вносит дополнительную погрешность, ухудшая точность отработки требуемых траекторий, и существенно зависит от выбора критериев коррекции и их аналитической проработки.

Современные жесткие требования к экономичности функционирования гусеничных машин и роботов совместно с требованиями высокой точности движения обуславливают актуальность задачи синтеза топливозаконочных регуляторов на координационном уровне.

### 1. Гусеничные роботы как объект управления

Основными структурными элементами гусеничного робота (ГР) как движущейся системы являются шасси с гусеничным движителем, силовая установка (как правило, дизельный ДВС) и силовая передача. Для мощных систем в качестве силовой передачи оправдано применение электромеханических трансмиссий (ЭТ), так как они обладают в сравнении с гидромеханическими трансмиссиями:

- меньшей удельной массой;
- более широким диапазоном регулирования тягового усилия, что особенно важно при невысокой удельной мощности силовых установок ГР;
- более высоким КПД при криволинейном движении;
- отсутствием кинематической связи между валом двигателя и ведущими зубчатыми колесами, что облегчает компоновку робота;
- более экономичной эксплуатацией.

В данной работе предлагается обобщенная структура ЭТ на примере машин постоянного тока, получивших распространение в тяжелых машинах, например карьерных самосвалах [5–6]. ЭТ должна обеспечить непрерывное преобразование крутящего момента в функции угловой скорости при постоянстве отбираемой от ДВС мощности. Таким образом, электромотор должен иметь гиперболическую характеристику крутящего момента в функции угловой скорости, а генератор — гиперболическую характеристику тока в функции напряжения. Наи-

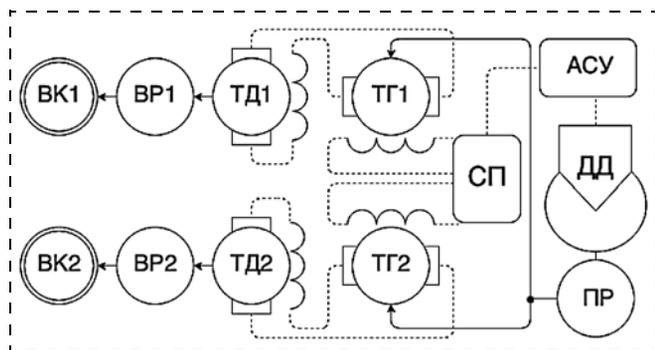


Рис. 1. Обобщенная схема гусеничного робота

более близко к гиперболе постоянной мощности подходит [7—9] характеристика двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ) и генератора параллельного возбуждения с противомкомпундной обмоткой (ГПТ), фактически — смешанного возбуждения.

Обобщенная схема гусеничного робота представлена на рис. 1.

На схеме показаны: тяговые электродвигатели ТД1 и ТД2, имеющие кинематическую связь с ведущими колесами ВК1 и ВК2 посредством вторичных (колесных) редукторов ВР1 и ВР2; два тяговых генератора ТГ1 и ТГ2, имеющих кинематическую связь с валом дизельного двигателя ДД посредством первичного редуктора ПР. Блок автоматической системы управления АСУ воздействует на обмотки возбуждения тяговых генераторов посредством силового преобразователя СП, а на органы ДВС — непосредственно. Все механические соединения показаны сплошной линией, а электрические — пунктирной.

Бортовые тяговые электродвигатели гусеничных машин в процессе криволинейного движения потребляют различную мощность. Для достижения высокой точности отработки спланированных траекторий необходим широкий диапазон регулирования угловых скоростей. Это означает необходимость установки минимум двух пар генератор — электродвигатель, как на рис. 1, либо дооснащение системы преобразователем ток — напряжение в случае единственного генератора.

Применение химических источников тока для рекуперации энергии торможения затруднительно в тяжелых гусеничных машинах (в связи с их недостаточной удельной энергоемкостью). Поэтому важной задачей оптимизации системы управления и планирования является задание такого профиля скорости и силы тяги, который позволил бы минимизировать потребность в торможении. Движение с постоянной мощностью позволяет ГР двигаться в диапазоне допустимых скоростей без торможения. Вне этого диапазона необходима организация многорежимного управления движением ГР.

Ключевой мерой энергоэффективности транспортных средств является расход топлива. Из тео-

рии ДВС известно [10—11], что топливозатраты близки к минимальным при оптимальном режиме работы силовой установки, а именно, при постоянстве скорости вращения выходного вала и развиваемой двигателем мощности, необходимой для совершения требуемой работы.

Таким образом, возникает задача оптимизации энергозатрат на координационном уровне — организации движения с постоянной мощностью силовой установки либо с ограничением мощности. Такой подход, в отличие от решений из работ [1—4], основан на естественном изменении скорости в зависимости от нагрузки, не требует применения интерполяторов и не зависит от искусственных критериев.

Выделим следующие основные режимы движения ГР:

- 1) по заданной траектории с заданной скоростью;
- 2) по заданной траектории в заданную точку;
- 3) в заданную точку по свободной траектории;
- 4) по заданной траектории с заданной мощностью силовой установки;
- 5) по заданной траектории в заданную точку с ограничением скорости или мощности силовой установки;
- 6) в заданную точку по свободной траектории с ограничением скорости или мощности силовой установки.

Методы синтеза алгоритмов движения подвижного объекта по первым трем режимам детально представлены в работах [12—14]. В данной статье предлагается метод синтеза алгоритмов управления движением мобильного робота по последним трем режимам с использованием алгоритмической базы методов позиционно-траекторного управления [12—13] и на примере ГР.

## 2. Математическая модель объекта управления

### 2.1. Математическая модель шасси

Модель шасси ГР может быть представлена следующей системой векторно-матричных уравнений [15—19] при допущении о преимущественной эксплуатации со скоростями до 25 м/с:

$$\dot{\mathbf{Y}} = [\dot{\mathbf{P}} \ \dot{\varphi}]^T = \mathbf{R}\mathbf{L}\mathbf{X}; \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{Q} - \mathbf{F}_R, \quad \mathbf{F}_R = \mathbf{L}_2^{-1}(\mathbf{F}_s \mathbf{f}' + \mathbf{L}_1^{-1} \mathbf{F}_O + \mathbf{F}_N); \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_s = \text{diag}((G/2)\cos\alpha\cos\beta), \quad \mathbf{F}_O = [G\sin\alpha + R_{TR} + F_a M_r]^T;$$

$$M_r = (\mu G l \cos\alpha \cos\beta (1 - (l\xi/2)^2))/4,$$

где  $\mathbf{Y}$  — вектор внешних координат (положения  $\mathbf{P}$  и ориентации  $\varphi$ );  $\mathbf{R}$  — матрица поворота;  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{L}_1$ ,  $\mathbf{L}_2$  — матрицы преобразования координат;  $\mathbf{X}$  — вектор внутренних координат (скоростей ведущих зубчатых колес);  $\mathbf{Q}$  — вектор моментов приводных двигателей;  $\mathbf{F}_R$  — суммарный вектор сопротивлений движению;  $\mathbf{f}'$  — вектор коэффициентов грунта;  $\mathbf{M}$  — матрица массоинерционных параметров и преоб-

разования координат с учетом коэффициента передачи вторичного редуктора и его КПД;  $\xi$  — смещение полюсов поворота;  $\alpha$  и  $\beta$  — углы поперечного и продольного наклона соответственно;  $G$  — вес;  $l$  — длина опорной поверхности гусениц;  $R_{TR}$  — сопротивление прицепа;  $F_a$  — сопротивление воздуха;  $M_r$  — момент сопротивления повороту;  $\mu$  — коэффициент сопротивления повороту;  $\mathbf{F}_N$  — вектор неизменяемых возмущений;  $\text{diag}()$  — функция преобразования вектора в диагональную матрицу с элементами вектора на ее главной диагонали;  $\dim \mathbf{Y} = 3 \times 1$ ,  $\dim \mathbf{R} = 3 \times 3$ ,  $\dim \mathbf{L} = 3 \times 2$ ,  $\dim \mathbf{L}_1 = \dim \mathbf{L}_2 = \dim \mathbf{M} = 2 \times 2$ ,  $\dim \mathbf{P} = \dim \mathbf{X} = \dim \mathbf{Q} = \dim \mathbf{F}_R = \dim \mathbf{F}_s = \dim \mathbf{F}_O = \dim \mathbf{F}_N = 2 \times 1$ .

## 2.2. Математическая модель электротрансмиссии

В связи с тем, что задача регулирования генераторов постоянного или переменного тока (с выпрямителем) на постоянную нагрузку является типовой [5, 8], представим модель генератора инерциальным звеном первого порядка. Применение упрощенных моделей (инерциального звена) для тягового ДПП ГР недопустимо в связи с высокой динамикой привода.

Математическая модель ДПП последовательно возбуждения [7–9] в матрично-векторной форме имеет вид:

$$\mathbf{U}_D = \mathbf{L}_D \dot{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{I}} \mathbf{r}_D + \mathbf{K}_v \mathbf{J}_\Phi \dot{\mathbf{I}} + \mathbf{K}_e \Phi \mathbf{X},$$

$$\mathbf{J}_\Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{I}^T}, \quad \tilde{\mathbf{I}} = \text{diag}(\mathbf{I}), \quad (3)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{K}_m \Phi \mathbf{I}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{U}_D$  — вектор напряжений на зажимах ДПП;  $\mathbf{L}_D$  — диагональная матрица суммарной индуктивности;  $\mathbf{r}_D$  — вектор суммарного сопротивления;  $\mathbf{K}_v$ ,  $\mathbf{K}_e$ ,  $\mathbf{K}_m$  — диагональные матрицы постоянных коэффициентов;  $\Phi$  — диагональная матрица магнитного потока (некоторая, в общем случае нелинейная, функция от  $\mathbf{I}$ );  $\mathbf{I}$  — вектор протекающих токов. Мгновенное значение токов полагаем измеряемым;

$$\dim \mathbf{U}_D = \dim \mathbf{I} = \dim \mathbf{r}_D = 2 \times 1;$$

$$\dim \mathbf{L}_D = \dim \mathbf{K}_v = \dim \mathbf{K}_e = \dim \mathbf{K}_m = \dim \Phi = \dim \mathbf{J}_\Phi = 2 \times 2.$$

Согласно рис. 1 вал ДВС соединен с валами генераторов посредством первичного редуктора со скалярным соотношением  $K_{PG}$ . ГПТ и ДПП одного борта соединены параллельно.

Обобщенная математическая модель ГПТ [8] в матрично-векторной форме имеет вид

$$\mathbf{U}_G = \mathbf{K}_G \mathbf{X}_G \Phi_G - \tilde{\mathbf{I}} \mathbf{r}_G; \quad (5)$$

$$\mathbf{Q}_G = J_G \dot{\mathbf{X}}_G = K_{PG} \mathbf{K}_{mg} \tilde{\mathbf{I}} \Phi_G, \quad (6)$$

где  $\mathbf{U}_G$  — вектор напряжений на зажимах ГПТ;  $\mathbf{r}_G$  — вектор суммарного сопротивления;  $\mathbf{K}_G$ ,  $\mathbf{K}_{mg}$  — диа-

гональные матрицы постоянных коэффициентов;  $\Phi_G$  — вектор магнитного потока;  $\mathbf{X}_G$  — вектор скоростей валов ГПТ,  $\mathbf{Q}_G$  — вектор моментов на валах ГПТ;  $J_G$  — скалярный момент инерции вала ГПТ;  $\dim \mathbf{U}_G = \dim \Phi_G = \dim \mathbf{r}_G = \dim \mathbf{Q}_G = 2 \times 1$ ,  $\dim \mathbf{K}_G = \dim \mathbf{X}_G = \dim \mathbf{K}_{mg} = 2 \times 2$ .

Управление возбуждением ГПТ строится по известным соотношениям [17–18] для достижения требуемого магнитного потока  $\Phi_G$ , который определяется в процессе формирования управляющих воздействий.

Уравнение скорости вала ДВС  $\omega_e$  и валов ГПТ:

$$[1 \ 1]^T \omega_e = K_{PG}^{-1} \mathbf{X}_G. \quad (7)$$

## 2.3. Математическая модель двигателя внутреннего сгорания

В данной работе предлагается обобщенная модель дизельного ДВС. Уравнение моментов двигателя представим в следующей скалярной форме [10, 11, 20, 21]:

$$J_e \dot{\omega}_e = M_{ind} - M_{fr} - M_{pump}, \quad (8)$$

$$M_{ind} = \frac{k_F U_F Q_{LHV} R_{gas} T_{in} (e_0 + e_1 \omega_e + e_2 \omega_e^2)}{\eta_V V_d P_{im}},$$

$$\eta_V = e_3 + e_4 \omega_e + e_5 \omega_e^2, \quad (9)$$

$$M_{fr} = \frac{125 V_d (e_6 + e_7 \omega_e + e_8 \omega_e^2)}{\pi}, \quad (10)$$

$$M_{pump} = e_9 P_{im} + e_{10}, \quad (11)$$

где  $J_e$  — момент инерции вращающихся частей ДВС,  $M_{ind}$  — индикаторный момент,  $M_{fr}$ ,  $M_{pump}$  — моменты сопротивления,  $R_{gas}$  — газовая постоянная,  $T_{in}$  — температура во впускном коллекторе,  $P_{im}$  — давление во впускном коллекторе,  $\eta_V$  — объемный КПД,  $V_d$  — объем впускного коллектора,  $Q_{LHV}$  — низшая теплотворность топлива,  $U_F$  — расход топлива,  $k_F$ ,  $e_0$ , ...,  $e_{10}$  — постоянные коэффициенты. Температуру и давление во впускном коллекторе полагаем измеряемыми.

## 3. Метод синтеза позиционно-траекторных алгоритмов управления с учетом требований к мощности

### 3.1. Цели управления

Зададим требование к траектории движения ГР в установившихся режимах 1 и 4 посредством следующей векторной функции внешних координат [12–14]:

$$\Psi_T = [N_1(\mathbf{P}) \mathbf{0}_n - 2]^T, \quad \dim \Psi_T = n \times 1, \quad (12)$$

а также в установившихся режимах 2, 3, 5 и 6 — посредством следующей векторной функции внешних координат [12–14]:

$$\Psi_T = [N_1(\mathbf{P}) \ N_2(\mathbf{P}) \ \mathbf{0}_n - 1]^T, \quad \dim \Psi_T = n \times 1. \quad (13)$$

Здесь  $N_1(\mathbf{P})$  и  $N_2(\mathbf{P})$  — функции от координат  $\mathbf{P}$  в неявной форме, задающие траектории движения ГР [22]. Скаляр  $n$  определяет размерность требований к установившемуся режиму движения ГР. В режимах 1, ..., 4  $n = 2$ , а в режимах 5, 6  $n = 3$ .

Зададим требование к мощности силовой установки ГР с желаемым значением  $w_j$  в установившемся режиме 4 посредством следующей векторной функции внутренних координат:

$$\tilde{\mathbf{W}} = [\mathbf{0}_{n-1} - |\mathbf{X}|^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}} + |\mathbf{X}|^T \mathbf{F}_R - w_j]^T, \quad \dim \tilde{\mathbf{W}} = n \times 1. \quad (14)$$

Зададим требование к траекторной скорости ГР с желаемым значением  $v_j$  в установившемся режиме 1 посредством следующей векторной функции внутренних координат:

$$\tilde{\mathbf{V}} = [0 \ \mathbf{X}^T \mathbf{L}^T \mathbf{X} - v_j^2 \ \mathbf{0}_{n-2}]^T, \quad \dim \tilde{\mathbf{V}} = n \times 1. \quad (15)$$

Зададим требования к максимальной траекторной скорости ГР или максимальной мощности силовой установки в установившихся режимах 5 и 6 посредством следующих векторных функции внутренних координат, соответственно:

$$\tilde{\mathbf{V}} = [0 \ \mathbf{X}^T \mathbf{L}^T \mathbf{L} \mathbf{X} \leq v_j^2 \ \mathbf{0}_{n-2}]^T, \quad \dim \tilde{\mathbf{V}} = 3 \times 1. \quad (16)$$

$$\tilde{\mathbf{W}} = [\mathbf{0}_{n-1} - |\mathbf{X}|^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}} + |\mathbf{X}|^T \mathbf{F}_R \leq w_j]^T, \quad \dim \tilde{\mathbf{W}} = 3 \times 1. \quad (17)$$

Желаемое значение скорости в (15), (16) зависит от конкретной задачи, выполняемой ГР, и, как правило, задается исходя из критерия времени выполнения задачи, либо некоторых технологических ограничений. В то же время, желаемое значение мощности в (14), (17), кроме обозначенных критериев, может быть задано в соответствии с оптимальной областью работы ДВС, что позволит существенно экономить топливо.

### 3.2 Аналитический синтез алгоритмов управления

Для ГР, описываемого системой уравнений (1)–(3), (5), (7)–(8), необходимо синтезировать закон управления  $\tilde{\mathbf{U}}$  в функции внешних и внутренних координат объекта, а также их производных по времени, который обеспечивал бы асимптотическую устойчивость в целом траекторий, удовлетворяющих требованиям к режиму функционирования ГР, задаваемым выражениями (12)–(17).

Вектор  $\tilde{\mathbf{U}}$  содержит расход топлива ДВС (см. (9)), вектор магнитного потока ГПТ (5) и напряжений ДПТ (3):

$$\tilde{\mathbf{U}} = [\mathbf{U}_F \ \Phi_G \ \mathbf{U}_D]^T, \quad \dim \tilde{\mathbf{U}} = 5 \times 1. \quad (18)$$

Метод синтеза алгоритма управления включает в себя 10 этапов:

1. Определим параметры шасси, электротрансмиссионных агрегатов и двигателя внутреннего сгорания (1)–(11).

2. Сформируем макропеременные (12)–(17) в зависимости от необходимого режима движения 1–6 и в соответствии с п. 3.1.

3. Зададим желаемый характер движения замкнутой системы в виде следующей системы матричных уравнений:

$$\dot{\Psi} = \Psi_T + \mathbf{A} \tilde{\mathbf{V}} + \mathbf{A} \dot{\Psi}_T; \quad (19)$$

$$\tilde{\Psi} = \Psi + \mathbf{T} \tilde{\mathbf{W}} + \mathbf{T} \dot{\Psi}; \quad (20)$$

$$\tilde{\tilde{\Psi}} = \tilde{\Psi} + \mathbf{C} \dot{\tilde{\Psi}};$$

$$\dim \mathbf{A} = \dim \mathbf{C} = \dim \mathbf{T} = n \times n, \quad (21)$$

где  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{T}$  и  $\mathbf{C}$  — диагональные матрицы коэффициентов настройки, задающие требуемый характер движения системы относительно целей управления и переходных процессов по ним.

4. Продифференцируем требования к установившемуся режиму движения ГР, полученные на этапе 2. Продифференцируем (12) или (13) трижды, (15) или (16) дважды, а (14) или (17) однократно. Затем решим их совместно с (19)–(21). Получим:

$$\mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K}_2 \ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K}_3 \dot{\mathbf{X}} + \Psi_T + \mathbf{K}_5 \tilde{\mathbf{V}} + (\mathbf{T} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{T}}) \tilde{\mathbf{W}} + \mathbf{C} \mathbf{T} \mathbf{K}_W + \mathbf{C} \mathbf{T} \mathbf{A} \mathbf{J} \ddot{\mathbf{Y}} + (\mathbf{C} \mathbf{T} \mathbf{A} \mathbf{J}_V + \mathbf{C} \mathbf{T} \mathbf{A} \mathbf{J}_W) \dot{\mathbf{X}} = 0; \quad (22)$$

$$\mathbf{K}_1 = (\mathbf{A} + \mathbf{T} + \mathbf{T} \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{T}} \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{T}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{C}) \mathbf{J} + (\mathbf{T} \mathbf{A} + \mathbf{C} \mathbf{T} \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{C}(\mathbf{T} + \mathbf{A})) \mathbf{T} + \mathbf{C} \mathbf{T} \mathbf{A} \dot{\mathbf{T}};$$

$$\mathbf{K}_2 = (\mathbf{T} \mathbf{A} + 2 \mathbf{C} \mathbf{T} \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{T}} \mathbf{A} + \mathbf{C} \mathbf{T} + \mathbf{C} \mathbf{A}) \mathbf{J} + \mathbf{C} \mathbf{T} \mathbf{A} \dot{\mathbf{T}};$$

$$\mathbf{K}_3 = (\mathbf{T} \mathbf{A} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{T}} \mathbf{A} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{C} \mathbf{A}) \mathbf{J}_V + \mathbf{C} \mathbf{T} \mathbf{A} \dot{\mathbf{T}}_V;$$

$$\mathbf{K}_5 = \mathbf{A} + \mathbf{T} \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{T}} \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{A}};$$

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{Y}^T}, \quad \mathbf{J}_V = \frac{\partial \tilde{\mathbf{V}}}{\partial \mathbf{X}^T}, \quad \mathbf{T} = \mathbf{J}, \quad \mathbf{T}_V = \mathbf{J}_V,$$

$$\mathbf{J}_W = [\mathbf{0}_{(n-1) \times 2} - |\mathbf{X}|^T \mathbf{M}]^T;$$

$$\mathbf{K}_W = [\mathbf{0}_{n-1} - |\dot{\mathbf{X}}|^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}} + |\dot{\mathbf{X}}|^T \mathbf{F}_R + |\mathbf{X}|^T \dot{\mathbf{F}}_R]^T;$$

$$\dim \mathbf{K}_2 = \dim \mathbf{K}_3 = \dim \mathbf{J}_V = \dim \mathbf{J}_W = \dim \mathbf{T}_V = 2 \times n, \quad \dim \mathbf{K}_1 = \dim \mathbf{K}_W = \dim \mathbf{T} = n \times n, \quad \dim \mathbf{J} = n \times 3.$$

5. Продифференцируем модель момента ДПТ (4) и подставим ее в уравнение (3), получим

$$\mathbf{U}_D = (\mathbf{L}_D + \mathbf{K}_V \mathbf{J}_\Phi) (\tilde{\mathbf{I}} \mathbf{K}_m \mathbf{J}_\Phi + \mathbf{K}_m \Phi)^{-1} \dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{K}_e \Phi \mathbf{X} + \tilde{\mathbf{I}} \mathbf{G}_D. \quad (23)$$

6. Продифференцируем модель шасси (1) дважды, модель (2) однократно, получим

$$\ddot{\mathbf{Y}} = \dot{\mathbf{R}} \mathbf{L} \mathbf{X} + \mathbf{R} \mathbf{L} \dot{\mathbf{X}}; \quad \ddot{\mathbf{Y}} = \ddot{\mathbf{R}} \mathbf{L} \mathbf{X} + 2 \dot{\mathbf{R}} \mathbf{L} \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{R} \mathbf{L} \ddot{\mathbf{X}}; \quad (24)$$

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} = \dot{\mathbf{Q}} - \dot{\mathbf{F}}_R. \quad (25)$$

7. Решим уравнение (22) совместно с (24) относительно  $\ddot{\mathbf{X}}$ , получим

$$\ddot{\mathbf{X}} = -\mathbf{K}_0^+ (\mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K}_2 \ddot{\mathbf{Y}} + (\mathbf{K}_3 + 2\mathbf{C}\mathbf{T}\mathbf{A}\mathbf{J}\mathbf{R}\mathbf{L})\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_4\mathbf{X} + \Psi_{\mathbf{T}} + \mathbf{K}_5\tilde{\mathbf{V}} + (\mathbf{T} + \mathbf{C}\mathbf{T})\tilde{\mathbf{W}} + \mathbf{C}\mathbf{T}\mathbf{K}_{\mathbf{W}}); \quad (26)$$

$$\mathbf{K}_0^+ = (\mathbf{K}_0\mathbf{K}_0^{\mathbf{T}})^{-1}\mathbf{K}_0^{\mathbf{T}} \text{ при } n = 3;$$

$$\mathbf{K}_0^+ = \mathbf{K}_0^{-1} \text{ при } n = 2, \quad (27)$$

$$\mathbf{K}_0 = \mathbf{C}\mathbf{T}\mathbf{A}(\mathbf{J} + \mathbf{J}_{\mathbf{V}}) + \mathbf{C}\mathbf{T}\mathbf{J}_{\mathbf{W}}; \quad (28)$$

$$\mathbf{K}_4 = \mathbf{C}\mathbf{T}\mathbf{A}\mathbf{J}\mathbf{R}\mathbf{L};$$

$$\dim \mathbf{K}_0 = 2 \times n, \dim \mathbf{K}_4 = n \times n.$$

Выражение (27) определяет псевдообратную матрицу от (28) в силу независимости столбцов (28).

8. Подставим (25) в (23), получим совместно с (26) вектор напряжений на зажимах ДПТ:

$$\mathbf{U}_{\mathbf{D}} = (\mathbf{L}_{\mathbf{D}} + \mathbf{K}_{\mathbf{V}}\mathbf{J}_{\Phi})(\tilde{\mathbf{I}}\mathbf{K}_{\mathbf{m}}\mathbf{J}_{\Phi} + \mathbf{K}_{\mathbf{m}}\Phi)^{-1}(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \dot{\mathbf{F}}_{\mathbf{R}}) + \mathbf{K}_{\mathbf{e}}\Phi\mathbf{X} + \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{r}_{\mathbf{D}}. \quad (29)$$

9. Методом обратной модели (5), с учетом (7), получим вектор значений возбуждения тяговых генераторов:

$$\Phi_{\mathbf{G}} = \mathbf{K}_{\mathbf{G}}K_{PG}^{-1}\omega_e(\mathbf{U}_{\mathbf{D}} + \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{r}_{\mathbf{G}}). \quad (30)$$

10. Методом обратной модели (6) и (8), с учетом (7), (9) и (30), получим значение мгновенного расхода топлива для управления ДВС

$$U_{\mathbf{F}} = \left( \frac{\eta_V V_d P_{im}}{k_F Q_{LHV} R_{gas} T_{im} (e_0 + e_1 \omega + e_2 \omega^2)} \right) \times$$

$$\times (M_{fr} + M_{pump} + \mathbf{K}_{\mathbf{E}}\mathbf{K}_{\mathbf{mg}}\tilde{\mathbf{I}}\Phi_{\mathbf{G}}); \quad (31)$$

$$\mathbf{K}_{\mathbf{E}} = J_e K_{PG} J_G^{-1} \eta_G \eta_D [1 \ 1],$$

где  $\eta_D$  и  $\eta_G$  — КПД электродвигателя и генератора соответственно. Уравнения (29)—(31) определяют компоненты вектора управления (18) и представляют собой искомый алгоритм управления роботом.

Метод, представленный в данной работе, отличается от метода позиционно-траекторного управления [12—13] тем, что уравнение (20) содержит дополнительное слагаемое, задающее требование к мощности (14) или (17); размерность системы увеличена, что позволяет применять дополнительный критерий, например ограничения мощности или скорости. Применение выражения (14) или (17) обуславливает необходимость в уравнении (21). Применение уравнения (21) позволяет расширенно учесть динамику привода (3), (4) для конструирования высокоточных систем. Коэффициенты матрицы настройки в уравнениях (20) и (21) задают характер переходного процесса по мощности.

### 3.3. Особенности многорежимного управления

Во время эксплуатации ГР очевидно существует необходимость переключать режимы, например режимы 1 и 4, при достижении ГР некоторой минимально допустимой заданием скорости при тяжёлом подъеме, требующем большей мощности. В таком случае необходимо переключить с режима 4 на режим 1, а после того, как критический участок будет пройден, переключить обратно с режима 1 на режим 4. В случае, если текущее значение скорости или мощности отличается на некоторое критическое значение от того, которое предусмотрено новым требованием к мощности или скорости, система будет испытывать динамические удары в момент переключения режимов. Для обеспечения мягкого переключения в данной работе предлагается следующая процедура:

1) задаются следующие требования к режиму функционирования ГР: (12), (16)—(17),  $n = 3$ . Коэффициенты  $s_0$  установившихся режимов в элементе матрицы  $A(2, 2)$  устанавливаются для режима стабилизации скорости, а в элементе матрицы  $T(3, 3)$  — для режима стабилизации мощности;

2) задается линейная функция перехода на новый режим  $s_{new} = k_n s_0$  в элементе матрицы  $A(2, 2)$  или  $T(3, 3)$ , а также функция  $s_{old} = -k_o s_0$  в элементе матрицы  $T(3, 3)$  или  $A(2, 2)$  текущего режима. Матрицы  $\dot{\mathbf{T}}$  и  $\dot{\mathbf{A}}$  содержат коэффициенты  $k_n$  и  $-k_o$ . Данные коэффициенты выбираются таким образом, чтобы время переключения обоих режимов было одинаковым;

3) при  $s_{old} = 0$   $n = 2$ , и система переключается в режим 1 или режим 4.

Во всех остальных режимах полагаем  $\dot{\mathbf{T}} = \dot{\mathbf{A}} = \mathbf{0}_{n \times n}$ .

Во время эксплуатации гусеничных машин возникают возмущения заданных режимов движения, способные в определенных случаях [17] привести к потере управляемости робота. В целях защиты ГР необходимо применение алгоритмов ограничений. Например, в работе [23] предложен метод синтеза робастных систем с ограничением управляемых переменных и фазовых координат, а в работе [24] предложен метод гомеостатического автомата ограничений. Предложенный метод переключения режимов движения может быть использован для переключения алгоритмов штатной работы и алгоритмов аварийного режима. При задании коэффициентов матриц настройки  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{T}$  положительными числами переключение будет мягким, так как оба режима будут устойчивы. В случае задания элементов матриц настройки, относящиеся к отключаемому режиму, отрицательными числами переключение будет форсированным, так как отключаемый режим будет неустойчивым. Метод мягкого переключения соответствует пограничному режиму автомата ограничений, а форсированный —

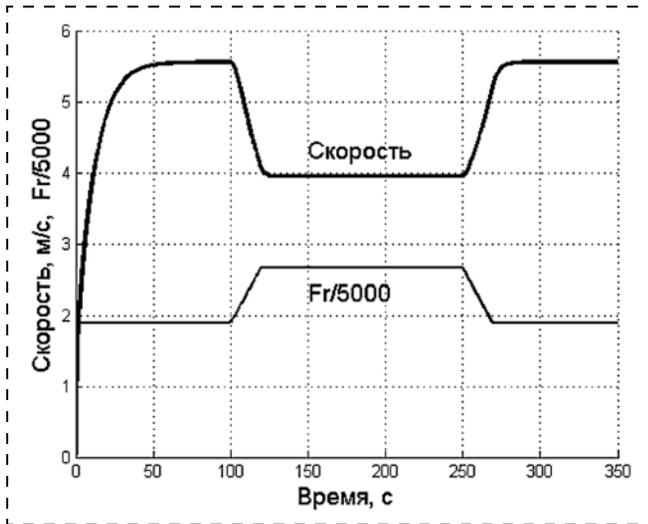


Рис. 2. Результаты моделирования скорости движения ГР по окружности с изменяющимся сопротивлением движению

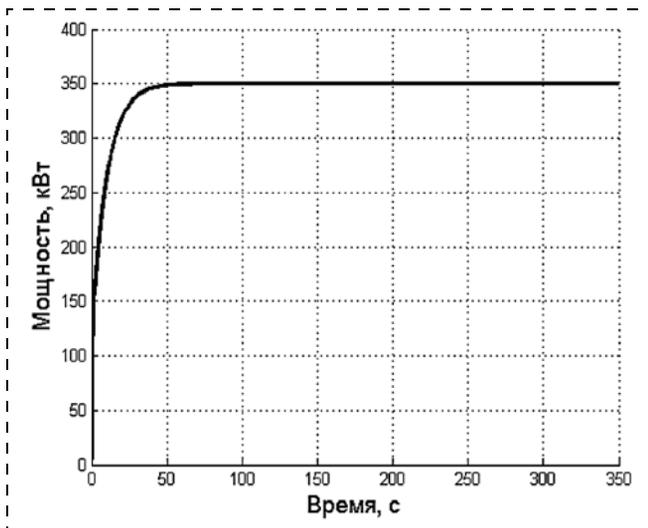


Рис. 3. Результаты моделирования потребляемой мощности при движении по окружности с изменяющимся сопротивлением движению

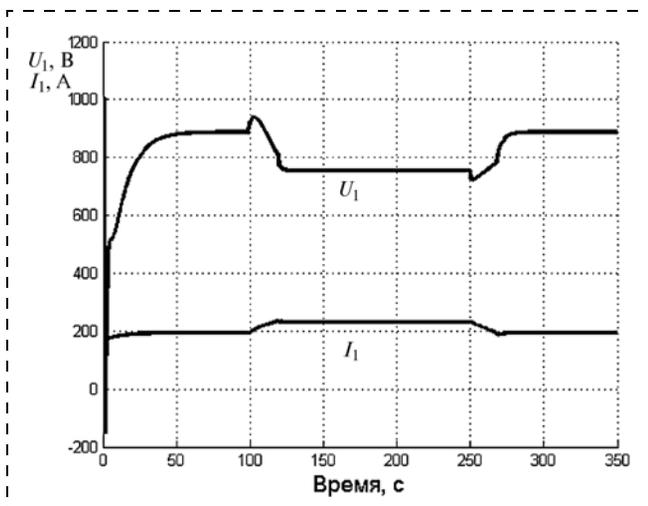


Рис. 4. График изменения напряжения  $U_1$  и силы тока  $I_1$  левого ДПТ во времени

аварийному, в смысле определений из работы [24]. Организация неустойчивых режимов движения разработана в работах [12–13].

Следует отметить, что разработка систем с ограничениями является весьма актуальной задачей, являющейся самостоятельным исследованием и выходящей за рамки настоящей работы.

#### 4. Компьютерное моделирование предложенного метода синтеза

Моделирование предложенных алгоритмов проведено в программном пакете MATLAB.

Шасси ГР представлено моделью (1) и (2) и имеет следующие параметры: масса 45 т, длина опорной поверхности гусениц 5,0 м, ширина 3,2 м, момент инерции  $4200 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , радиус ведущего колеса 0,3 м.

Тяговые электродвигатели представлены моделью (3)–(4) и имеют следующие параметры: максимальное напряжение 1000 В, максимальная мощность 250 кВт,  $L_D = \text{diag}(0,05)$ ,  $r_D = \text{diag}(0,1)$ ,  $K_V = \text{diag}(8)$ ,  $K_e = \text{diag}(0,2467)$ ,  $K_m = (0,25)$ ,  $\Phi = I$ .

Зададим требование к движению ГР выражением (12), соответствующим движению по окружности радиусом 100 м с центром в начале координат, и выражением (14), соответствующим стабилизации постоянной мощности 350 кВт. Значение матриц коэффициентов настройки  $A = T = C = \text{diag}(1,10)$ ;  $n = 2$ ; начальное положение робота  $Y = [105 \ 0 \ \pi/4]^T$ . В начальном положении робот не движется. Время моделирования 350 с.

Без потери общности представим вектор сопротивлений движению постоянными величинами:  $F_r = \text{diag}(9450)$ . Через 100 с после начала моделирования вектор сопротивления увеличится до 13 300 за 20 с. Через 250 с после начала моделирования вектор сопротивления уменьшится до 9450 за 20 с, что позволит проанализировать реакцию системы на изменение сопротивления движению.

Система, замкнутая управлением (29)–(31), должна обеспечивать устойчивое движение по траектории (12) со среднеквадратическим отклонением менее 0,5 в установившемся режиме.

Результаты моделирования скорости движения ГР представлены на рис. 2.

Результаты моделирования потребляемой мощности представлены на рис. 3.

Из рис. 2 и рис. 3 видно, что система, замкнутая управлением (29)–(31), обеспечивает стабилизацию мощности (14) на заданном значении при изменении сопротивления движению. Графики изменения напряжения и силы тока для левого двигателя представлены на рис. 4.

Графики изменения напряжения и силы тока для правого двигателя представлены на рис. 5.

Траектория движения ГР по окружности представлена на рис. 6.

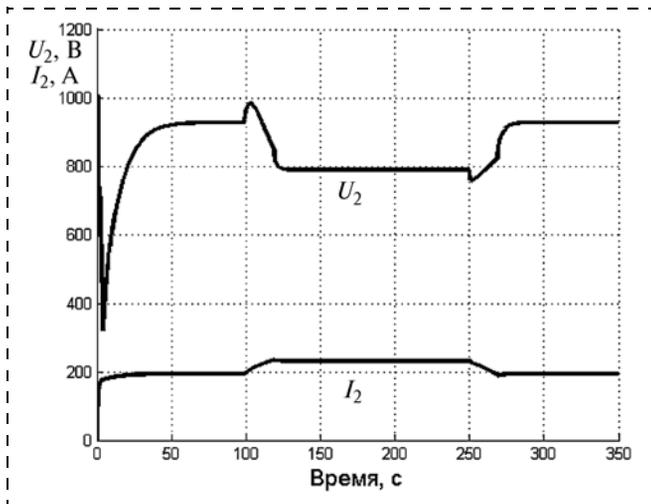


Рис. 5. График изменения напряжения  $U_2$  и силы тока  $I_2$  правого ДПТ во времени

Среднеквадратическое отклонение составило 0,3422, что удовлетворяет поставленным требованиям.

### Заключение

Представленные в данной статье решения расширяют возможности позиционно-траекторного управления на класс систем, движение которых осуществляется с постоянным значением мощности силовой установки, а также с ограничением максимальной мощности или скорости.

В работе рассмотрен метод многорежимного управления движением мобильного робота. Приводятся решения, позволяющие синтезировать алгоритмы нелинейного управления для роботов, оснащенных электротрансмиссией.

Представленные решения позволяют повысить функциональность мобильных роботов, минимизировать топливозатраты в установившемся режиме без ухудшения качественных характеристик точности и быстродействия.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ-3437.2014.10.*

### Список литературы

1. Kim H. J., Kim B. K. Minimum-energy trajectory planning on a tangent for battery-powered three-wheeled omni-directional mobile robots // Control Automation and Systems (ICCAS). 2010. P. 1701–1706.
2. Liu S., Sun D. Optimal motion planning of a mobile robot with minimum energy consumption // Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). 2011. P. 43–48.
3. Mei Y., Lu Y. H., Hu Y. C., Lee C. S. Energy-efficient motion planning for mobile robots // Proc. ICRA 2004 IEEE International Conference. 2004. V. 5. P. 4344–4349.
4. Howard T. M., Kelly A. Optimal Rough Terrain Trajectory Generation for Wheeled Mobile Robots // The International Journal of Robotics Research. 2007. V. 26, N. 2. P. 141–166.
5. Ефремов И. С. Теория и расчет тягового привода электромобиля. М.: Высшая школа, 1984. С. 383.
6. Кулешов А. А. Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы карьеров. М.: Недра, 1980. С. 317.
7. Ключев В. И. Теория электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 697 с.
8. Вольдек А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. 832 с.

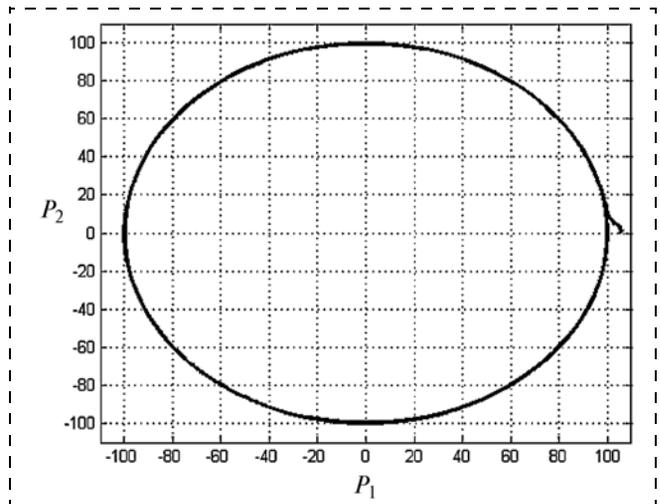


Рис. 6. Траектория движения ГР по окружности

9. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
10. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, 1988. 930 p.
11. Dextreit C., Kolmanovsky I. Approaches to energy management of hybrid electric vehicles: Experimental comparison // Proc. of UKACC International Conference in Control. 2010. V. 1. P. 277–283.
12. Пшихопов В. X. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. 183 с.
13. Пшихопов В. X., Медведев М. Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М.: Наука, 2011. 350 с.
14. Пшихопов В. X., Медведев М. Ю., Гайдук А. Р., Нейдорф Р. А., Беляев В. Е., Федоренко Р. В., Костюков В. А., Крухмалев В. А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация и управление. 2013. № 7. С. 13–20.
15. Le A. T. Modelling and Control of Tracked Vehicles. Sydney: University of Sydney, 1999. 208 p.
16. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. М.: Машиностроение, 1982. 284 с.
17. Погосов Д. Б. Построение и анализ математической модели высокоманевренных гусеничных роботов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2011. № 1. С. 301–306.
18. Сергеев Л. В. Теория танка. М.: Издание академии бронетанковых войск, 1973. 493 с.
19. Пшихопов В. X., Медведев М. Ю., Гайдук А. Р., Нейдорф Р. А., Беляев В. Е., Федоренко Р. В., Костюков В. А., Крухмалев В. А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. 2013. № 6. С. 14–21.
20. Jankovic M., Kolmanovsky I. Constructive Lyapunov control design for turbocharged diesel engines // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2000. V. 8, N. 2. P. 288–299.
21. Yanakiev D., Kanellakopoulos I. Engine and Transmission Modeling for Heavy-Duty Vehicles // PATH technical note. 1995. P. 64.
22. Погосов Д. Б. Преобразование сплайн функций высоких порядков к неявной форме // Матер. междунар. науч.-практ. конф. "Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012". Вып. 3. Т. 4. Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. С. 84–87.
23. Пшихопов В. X., Медведев М. Ю. Блочный синтез робастных систем при ограничениях на управления и координаты состояния // Мехатроника, автоматизация и управление. 2011. № 1. С. 2–8.
24. Филимонов А., Филимонов Н. Автомат ограничений управляемых динамических процессов // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск "Перспективные системы и задачи управления". Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2013. Т. 140, № 3. С. 155–161.

## Position-Trajectory Control with Power Regulation by Example of Tracked Robots

Introduced in this paper solutions allow to synthesize fuel performance control systems for off-road vehicles motion. Developed method for regulation the engine power or limit the vehicle speed or power at a desired level. This paper contains nonlinear and multilinked mathematical models of the robots chassis, its electrical transmission based on DC units and a diesel engine.

Fuel consumption rate is near to the minimum at an optimal mode of operation of the engine, namely at a constant rotational speed of the output shaft and developed by the engine power, which needed to the robots job. This defines the task of synthesis of a control system of the robot motion with high precision and with a constant power of the traction motors. During the robot motion, its speed varies depending on a motion resistance. Presented in this paper solutions empower the position-trajectory control method for a class of systems, which motion is realized with a constant traction motors power, as well as a limitation of a maximum power or speed. In the paper presents a method of soft a motion mode switching. In this paper presents solutions for synthesize the nonlinear control algorithms for robots equipped with an electric transmission.

Together, the introduced solutions can improve the functionality of mobile robots, minimize fuel consumption at steady state without deterioration the characteristics of accuracy and speed. Simulation of the algorithms was executed in MATLAB package and the results shown a high efficiency of the introduced solutions.

**Keywords:** tracked robot, motion control, the position-trajectory control, power regulation, electric transmission, multi-mode control, energy performance

### References

1. Kim H. J., Kim B. K. Minimum-energy trajectory planning on a tangent for battery-powered three-wheeled omni-directional mobile robots. *Control Automation and Systems (ICCAS)*. 2010. P. 1701–1706.
2. Liu S., Sun D. Optimal motion planning of a mobile robot with minimum energy consumption. *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 2011. P. 43–48.
3. Mei Y., Lu Y. H., Hu Y. C., Lee C. S. Energy-efficient motion planning for mobile robots. *Proc. ICRA 2004 IEEE International Conference*. 2004. V. 5. P. 4344–4349.
4. Howard T. M., Kelly A. Optimal Rough Terrain Trajectory Generation for Wheeled Mobile Robots. *The International Journal of Robotics Research*. 2007. V. 26, N. 2. P. 141–166.
5. Efremov I. S. Teoriya i raschet tyagovogo privoda elektromobilya. M.: Vysshaya shkola, 1984. P. 383.
6. Kuleshov A. A. Moshchnye ekskavatorno-avtomobil'nye kompleksy kar'erov. M.: Nedra, 1980. P. 317.
7. Klyuchev V. I. Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov. M.: Energoatomizdat, 1998. 697 p.
8. Vol'dek A. I. Elektricheskie mashiny. L.: Energiya, 1978. 832 p.
9. Chilikin M. G., Sandier A. S. Obshchiy kurs elektroprivoda. M.: Energoizdat, 1981. 576 p.
10. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, 1988. 930 p.
11. Dextreit C., Kolmanovsky I. Approaches to energy management of hybrid electric vehicles: Experimental comparison. *Proc. of UKACC International Conference in Control*. 2010. V. 1. P. 277–283.
12. Pshikhopov V. Kh. Pozitsionno-traektomoe upravlenie podvizhnymi ob'ektami. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009. 183 p.
13. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu. Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh. M.: Nauka, 2011. 350 p.
14. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu., Gayduk A. R., Neydorf R. A., Belyaev V. E., Fedorenko R. V., Kostyukov V. A., Krukhamlev V. A. Sistema pozitsionno-traektornogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: algoritmy upravleniya. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie*. 2013. N. 7. P. 13–20.
15. Le A. T. Modelling and Control of Tracked Vehicles. Sydney: University of Sydney, 1999. 208 p.
16. Vong Dzh. Teoriya nazemnykh transportnykh sredstv. M.: Mashinostroenie, 1982. 284 p.
17. Pogosov D. B. Postroenie i analiz matematicheskoy modeli vysokomanevrennykh gusenichnykh robotov. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2011. N. 1. P. 301–306.
18. Sergeev L. V. Teoriya tanka. M.: Izdanie akademii bronetankovykh voysk, 1973. 493 p.
19. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu., Gayduk A. R., Neydorf R. A., Belyaev V. E., Fedorenko R. V., Kostyukov V. A., Krukhamlev V. A. Sistema pozitsionno-traektornogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: matematicheskaya model'. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie*. 2013. N. 6. P. 14–21.
20. Jankovic M., Kolmanovsky I. Constructive Lyapunov control design for turbo-charged diesel engines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2000. V. 8, N. 2. P. 288–299.
21. Yanakiev D., Kanellakopoulos I. Engine and Transmission Modeling for Heavy-Duty Vehicles. *PATH technical note*. 1995. P. 64.
22. Pogosov D. B. Preobrazovanie splayn funktsiy vysokikh porjadkov k neyavnnoy forme. *Mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Nauchnye issledovaniya i ikh prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya 2012"*. Iss. 3. V. 4. Odessa: KUPRIENKO, 2012. P. 84–87.
23. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M. Yu. Blochnyy sintez robastnykh sistem pri ogranicheniyakh na upravleniya i koordinaty sostoyaniya. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie*. 2011. N. 1. P. 2–8.
24. Filimonov A., Filimonov N. Avtomat ogranicheniy upravlyayemykh dinamicheskikh protsessov. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. Tematicheskii vypusk "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya"*. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU. 2013. V. 140, N. 3. P. 155–161.

УДК 531.715.1: 621.373.8

**С. А. Савонин**<sup>1</sup>, вед. инженер, savonin@rambler.ru,

**А. Ю. Абрамов**<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. аук., ст. науч. сотр., abramovay85@mail.ru,

**В. П. Рябухо**<sup>1, 2</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лабораторией, rvp-ptics@yandex.ru

<sup>1</sup> Саратовский государственный университет, г. Саратов

<sup>2</sup> Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

## Цифровая голографическая микроинтерферометрия процессов взаимодиффузии в прозрачных средах

*Рассматриваются цифровые голографические микроинтерферометры с численной процедурой восстановления комплексной амплитуды объектных полей для высокоразрешающего анализа пространственного распределения компонентов взаимодиффузии веществ в системах "твердое вещество — жидкость" и "жидкость I — жидкость II". Описано экспериментальное оборудование и методика эксперимента, обсуждаются особенности применения метода и возможности повышения пространственного разрешения получаемых цифровых интерферограмм.*

**Ключевые слова:** голографические интерферометры, диффузия, массоперенос, численная обработка, Фурье-голограммы, пространственная фильтрация

### Введение

В настоящее время микрообъекты и среды, прозрачные для излучения оптического диапазона, широко распространены в промышленности. К ним относятся полимерные пленки, синтетические волокна, оптические кристаллы, микродетали, оптоволоконные изделия и др. Такие прозрачные объекты и среды изменяют (модулируют) фазу проходящего через них оптического поля [1, 2]. В общем случае фазовые среды описываются трехмерным пространственным распределением показателя преломления  $n(x, y, z)$ , который определяется плотностью, температурой, концентрацией вещества и другими физическими параметрами. Протекающие в прозрачных средах процессы, в частности диффузионные, имеют важное практическое значение для анализа и разделения веществ, разработки регламентов технологических процессов. Диффузия компонентов играет основополагающую роль в процессах набухания и растворения, адгезии, ликвации, пленко- и волокнуобразования, адресной доставки лекарственных препаратов и т. д. [3].

Для изучения кинетики процесса массопереноса традиционно применяют косвенные физико-химические методы [4]. Особое место среди методов исследования массопереноса получили когерентно-оптические методы анализа и контроля, в частности интерференционные методы [3—6], обладающие высокой чувствительностью и позволяющие контролировать быстротекающие процессы в режиме реального времени. По данным интерферометрии определяют профили распределения пока-

зателя преломления, концентрации, рассчитывают коэффициенты взаимодиффузии, оценивают термодинамические параметры. Результаты интерферометрии применяют при моделировании процессов нанесения и сушки покрытий, деструкции полимеров в различных средах и др. [4]. В последнее время отмечается тенденция к расширению применения интерференционных методов исследования в таких областях, как биохимия и фармакология. Методом интерферометрии исследуются процессы массопереноса и растворимости лекарственных препаратов в полимерных матрицах [7], интерферометрия может успешно применяться для изучения биодegradации полимеров. Появление современных цифровых средств регистрации фото- и видеосигнала, а также быстрое развитие вычислительных средств позволили разработать методы цифровой интерферометрии.

Однако в этих методах пространственная фазовая модуляция по объекту проявляется в изображении через систему интерференционных полос, пространственный период которых соответствует изменению фазы объектного поля на  $2\pi$  рад. При исследовании диффузионных процессов в области контакта сред наблюдается скачок показателя преломления, который приводит к большому градиенту фазовых возмущений в оптическом поле объекта. Интерференционные полосы на интерферограмме сближаются, перестают разрешаться — происходит ограничение возможностей поперечного пространственного разрешения фазовых неоднородностей в среде. При исследовании объектов и сред с про-

странственно сложной фазовой структурой, при наличии большого градиента фазовой модуляции волнового поля происходит смещение области локализации интерференционных полос, что обуславливает последующие проблемы с качественной и количественной интерпретацией формирующихся интерференционных картин со сложным рисунком полос. При исследовании быстропротекающих процессов изменения фазовой структуры в среде, например, в ходе процесса массопереноса, описанные трудности только возрастают.

Цель настоящей работы состояла в преодолении перечисленных выше проблем при совместном использовании методов микроскопии, интерферометрии и оптической голографии в сочетании с высокоразрешающей цифровой фотографией. Совместное использование этих методов и технологий, как показывают результаты данной работы, предоставляет новые уникальные возможности в исследовании фазовых микрообъектов и микропроцессов, протекающих в таких объектах.

В качестве модельных систем рассматривались системы "хитозан — вода" (твердое вещество — жидкость) и "этиловый спирт — вода" (жидкость I — жидкость II). Выбор компонентов определяется достаточной разницей в значении показателя преломления, отличиями в молекулярной массе и вязкости. Показано применение двух схемных решений цифрового голографического микроинтерферометра, а также приведено описание программного

обеспечения для численной реализации метода голографической интерферометрии путем восстановления комплексной амплитуды объектного поля с записанной цифровой голограммы.

### Схемные решения цифрового голографического микроинтерферометра

В методе цифровой голографии [8] реализуется запись голограммы — картины интерференции объектной и опорной волн — посредством матричного фоторегистрирующего устройства (цифровой ПЗС- или КМОП-камеры) с последующим численным восстановлением и преобразованием комплексной амплитуды объектного поля с помощью средств компьютерных вычислений [9]. При работе с микрообъектами, при изучении процессов, протекающих в микрообъектах сред, предпочтительно, чтобы в плоскости матричного фотоприемника формировалось или полное увеличенное изображение изучаемого объекта, или его отдельный фрагмент. Поэтому для реализации метода цифровой голографической микроинтерферометрии нередко наиболее эффективной выступает схема записи голограммы сфокусированного изображения [10].

Численное восстановление комплексного объектного поля с записанной голограммы осуществляется посредством прямого вычисления того дифракционного преобразования (в общем случае дискретного преобразования Френеля), которое

осуществлялось на этапе записи голограммы [11]. С позиции уменьшения вычислительной сложности, на практике наиболее удобно использовать преобразование Фурье, в особенности алгоритмы быстрого Фурье-преобразования. В настоящей работе для реализации метода цифровой голографической микроинтерферометрии разработаны две схемы записи Фурье-голографии сфокусированного изображения объекта с необходимым поперечным увеличением изображения.

На рис. 1 представлена оптическая схема записи, в которой используется деление по волновому фронту исходного лазерного пучка на опорный и объектный. В схеме применены два жестко связанных между собой микрообъектива OB1 и OB2 в объектном и опорном каналах, что обеспечивает высокую стабильность системы в условиях внешних возмущений и простоту юстировки оптических

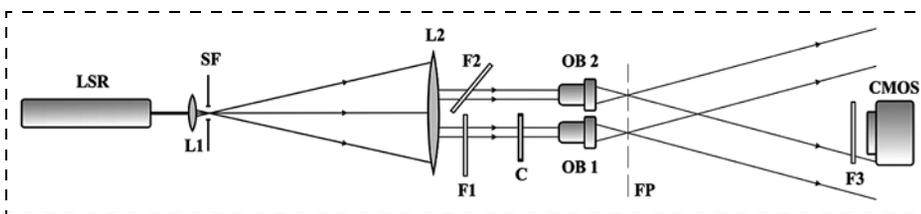


Рис. 1. Цифровой голографический микроинтерферометр с делением по волновому фронту: LSR — He—Ne лазер; SF — пространственный фильтр; L1—L2 — коллиматор; F1, F2, F3 — нейтральные фильтры; С — исследуемый объект; OB1, OB2 — микрообъективы; FP — фокальная плоскость микрообъективов; CMOS — КМОП-камера

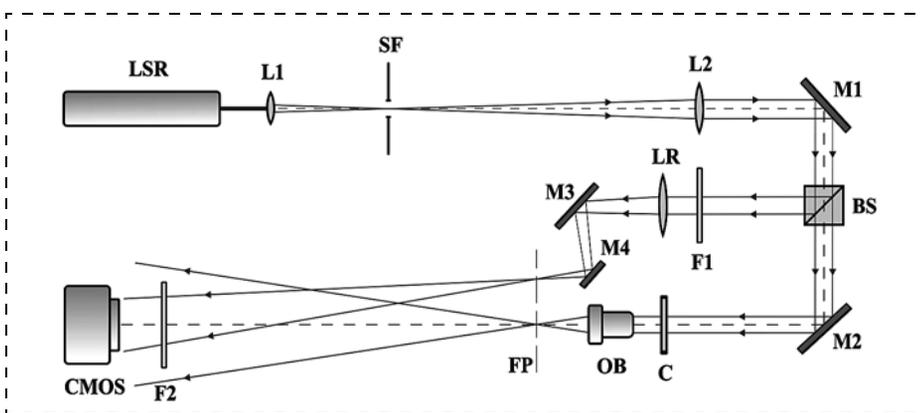


Рис. 2. Цифровой голографический микроинтерферометр с делением по амплитуде: LSR — He—Ne лазер; SF — пространственный фильтр; L1—L2 — коллиматор; M1, M2, M3, M4 — зеркала; BS — делитель; F1, F2 — нейтральные фильтры; LR — линза; С — исследуемый объект; OB — микрообъектив; FP — фокальная плоскость микрообъектива; CMOS — КМОП-камера

элементов схемы. С помощью микрообъектива ОВ1 формируется сфокусированное изображение прозрачного (фазового) объекта С на матричном фоторегистраторе CMOS.

Преимущество схемы с делением лазерного пучка по амплитуде (рис. 2) состоит в более высокой степени компактности установки и в существенно меньших потерях лазерного излучения при распространении от источника до цифровой фотокамеры, что позволяет использовать лазеры небольшой мощности. Выбор конкретной реализации схемы записи Фурье-голографии сфокусированного изображения должен определяться практическими соображениями: доступностью лазерных источников заданной мощности, ограничениями на размер зоны проведения экспериментальных работ, геометрическими размерами объекта, удобством его позиционирования и т. д.

Вне зависимости от выбранной оптической схемы критическое требование для записи цифровых голограмм состоит в необходимости разрешения фоторегистрирующей матрицей спекл-структуры изображения объекта и голограммной интерференционной структуры — системы несущих интерференционных полос, образованных наложением опорной волны на объектное поле.

Пространственная частота голограммной интерференционной структуры  $f_S$  определяется длиной волны  $\lambda$  лазерного источника и углом  $\theta$  между опорным и объектным пучками:

$$f_S = \frac{1}{d} \approx \frac{\sin\theta}{\lambda},$$

где  $d$  — пространственный период интерференционных полос.

Согласно теореме Котельникова [12, 13] частота дискретизации  $f_D$  должна быть больше удвоенной максимальной частоты  $f_S$ , присутствующей в регистрируемом сигнале:

$$f_D = \frac{1}{\Delta x} \geq 2f_S,$$

где  $\Delta x$  — период расположения пикселей матрицы цифровой фотокамеры.

В настоящей работе для регистрации цифровых голограмм использовалась КМОП-камера DCM-300 (размер матрицы  $2048 \times 1536$  пкс, линейный размер  $6,4 \times 4,8$  мм, межпиксельное расстояние 3,5 мкм). Для угла  $\theta$  можно получить следующую оценку:

$$\theta_{\max} < \frac{\lambda}{2\Delta x} \approx 5,2^\circ.$$

Таким образом, основное условие записи цифровой го-

логаммы заключается в необходимости использования достаточно малых углов между опорным и объектным пучками. Это накладывает определенные геометрические ограничения на схемные решения, применяемые при реализации метода цифровой голографической микроинтерферометрии.

### Алгоритм обработки цифровых голограмм

В методе цифровой голографии процедура восстановления комплексной амплитуды объектного поля в плоскости его изображения осуществляется в численной форме посредством специализированных алгоритмов.

Их принцип заключается в следующем. Цифровая голограмма (рис. 3, а) рассматривается как числовая матрица (размера  $M \times N$ ) распределения интенсивности  $I(x_i, y_j)$  в плоскости светочувствительного сенсора камеры. В данной работе при записи этой голограммы квазиточечный источник опорной волны располагался в плоскости выходного зрачка формирующего изображение микрообъектива (плоскость FP на рис. 1 и 2). Таким образом, выполнялось условие записи так называемой безлинзовой голограммы Фурье [14] для выходного зрачка микрообъектива.

Для восстановления комплексной амплитуды пространственного спектра голограммы  $I(x_i, y_j)$  она подвергалась дискретному Фурье-преобразованию:

$$U_D(\xi_m, \eta_n) = F\{I(x_i, y_j)\} = F\{|U_S|^2\} + F\{|U_R|^2\} + F\{U_S U_R^*\} + F\{U_S^* U_R\},$$

где  $U_R(x_i, y_j)$  и  $U_S(x_i, y_j)$  — комплексные амплитуды опорного и объектного полей соответственно;  $i, m = 0, 1, 2, \dots, M-1$  и  $j, n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ .

На рис. 3, б представлено изображение пространственного спектра цифровой голограммы сфокусированного изображения. В спектре присутствуют четыре компонента: в центре — изображение точечного опорного источника и дифракционное гало вокруг него, симметрично относительно гало — распределения интенсивности пространственного

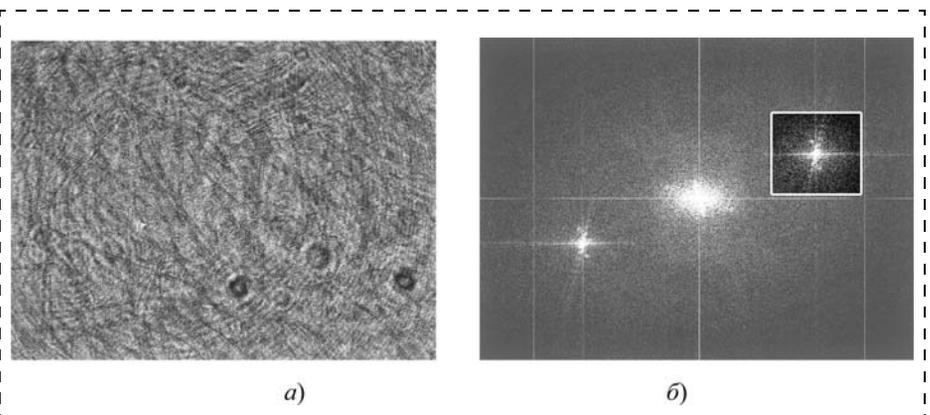


Рис. 3. Алгоритм численной обработки цифровых голограмм: а — фрагмент цифровой голограммы; б — пространственно-частотная фильтрация спектра цифровой голограммы

спектра объектного поля  $|F\{U_S U_R^*\}|^2$  и поля, ему комплексно сопряженного,  $|F\{U_S^* U_R\}|^2$ .

Над спектром голограммы осуществляется процедура пространственной фильтрации — из спектра выделяются только те пространственные частоты, которые соответствуют объектному полю (рис. 3, б):

$$U_B(\xi_m, \eta_n) = U_D(\xi_m, \eta_n)B(\xi_m, \eta_n),$$

где  $B$  — апертурная функция окна фильтрации.

Комплексная амплитуда поля изображения объекта  $U_{obj}(x_i, y_j)$  восстанавливается посредством применения обратного двумерного Фурье-преобразования к отфильтрованной области пространственного спектра.

Фазовые интерференционные исследования микрообъектов и микросред осуществляются путем вычисления интенсивности суммарного или разностного полей комплексных амплитуд от двух объектных полей, соответствующих различным состояниям контролируемого объекта (среды). Для формирования цифровой голографической интерферограммы  $I_{21}^+(x, y)$ , отражающей фазовые изменения в объекте, в общем случае необходимо вычислить квадрат модуля суммы комплексных амплитуд объектных полей, соответствующих различным состояниям микрообъекта:

$$I_{21}^+(x, y) = |U_{S2}(x, y) + U_{S1}(x, y)|^2 = 4I_{S1} \cos^2 \left[ \frac{\Delta\varphi_{21}(x, y)}{2} \right],$$

где  $U_{S2}(x, y)$  и  $U_{S1}(x, y)$  — комплексные амплитуды объектных полей,  $\Delta\varphi_{21}(x, y)$  — фазовый сдвиг, обусловленный изменениями в объекте.

Косинусоидальный множитель (в выражении для  $I_{21}^+(x, y)$ ) модулирует восстановленное изображение объектного поля  $I_{S1}$  в соответствии с законом изменения  $\Delta\varphi_{21}$  по поверхности объекта. При этом на изображении появляются интерференционные полосы, характер которых позволяет определить функцию  $\Delta\varphi_{21}$ . Таким образом, напрямую измеряемым в эксперименте параметром фазового микрообъекта (микросреды) является оптическая разность хода, связанная с соответствующей разностью фаз:

$$\Delta(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi_{21}(x, y).$$

По выборке значений оптической разности хода можно восстановить пространственное распределение показателя преломления  $n(x, y, z)$ , и вычислить производные характеристики от этой величины: концентрацию, плотность, морфологические и морфометрические характеристики микрообъекта.

В данной работе на цифровых голографических микроинтерферометрах (ЦГМИ), выполненных в соответствии с оптическими схемами на рис. 1 и рис. 2, проведено исследование кинетики процесса массопереноса в двух модельных системах: "жидкость I — жидкость II" (этиловый спирт — вода) и "твердое вещество — жидкость" (хитозан — вода).

• **Исследование взаимодиффузии в системе "этиловый спирт — вода"**

Исследование процесса взаимодиффузии компонентов в модельной системе "этиловый спирт — вода" осуществлено на ЦГМИ по схеме, показанной на рис. 1. В работе использовали ректифицированный этиловый спирт и дистиллированную воду в кювете толщиной 1 мм. Значения показателей преломления жидкостей определяли на рефрактометре ИРФ-22. Эксперименты проводили при 25 °С и нормальном атмосферном давлении. Регистрация цифровых голограмм осуществлялась на КМОП-камеру в режиме непрерывного ввода кадров.

Методика эксперимента состояла в следующем. Первоначально кювету полностью заполняли дистиллированной водой и записывали голограмму. Затем с помощью шприца осторожно откачивали воду из кюветы примерно до половины и медленно заливали в кювету спирт, не допуская перемешивания жидкостей. Изображение границы раздела жидкостей позиционировали в центр матрицы камеры.

В оптической схеме были задействованы микрообъективы с увеличением 40х и числовой апертурой  $NA = 0,65$ , что обеспечивало высокое поперечное пространственное разрешение изображения  $\Delta r \approx 0,61\lambda/NA = 0,59$  мкм, что связано с необходимостью разрешения пространственно высокочастотных интерференционных полос, возникающих в области контакта этилового спирта с водой. Микрообъектив ОВ1 формировал увеличенное изображение кюветы на матрице цифровой камеры.

Взаимодиффузия жидкостей приводит к изменению пространственного распределения показателя преломления и, как следствие, к изменению фазового сдвига объектного поля с течением времени.

Для определения фазового распределения в системе "этиловый спирт — вода" проводили численное формирование цифровых интерферограмм  $I_{21}(x, y)$  в интересующем диапазоне состояний системы. Для этого восстанавливали комплексную амплитуду объектного поля с голограммы, соответствующей заданному моменту времени, и вычитали из него объектное поле, соответствующее голограмме кюветы, полностью заполненной водой.

Вычисляемые таким образом цифровые интерферограммы (рис. 4) качественно и количественно отражают закономерности пространственного распределения показателя преломления образующегося раствора. В области взаимодиффузии происходит формирование раствора спирта в воде, о чем сви-

детельствует непрерывное изменение показателя преломления (рис. 4, а–в). С течением времени наблюдается расширение зоны диффузии.

По формируемым цифровым интерферограммам рассчитывали профиль распределения показателя преломления и концентрационного профиля (рис. 5), а также коэффициентов диффузии. Методика расчетов принципиально не отличалась от предложенных авторами ранее в работах [15, 16] при использовании классических лазерных интерферометров.

Поскольку показатель преломления системы "этиловый спирт — вода" линейно зависит от концентрации компонентов, то профиль изменения показателя преломления совпадает с концентрационным профилем. В зоне взаимодиффузии наблюдается непрерывное изменение концентрации и показателя преломления (см. рис. 5) при переходе от одного компонента к другому, что обусловлено образованием раствора.

При дальнейшем протекании процесса массопереноса происходит уширение зоны диффузии и, как следствие, изменение профиля показателя преломления и концентрации.

Коэффициенты взаимодиффузии рассчитывались с использованием теории Матано—Больцмана [4]. Анализ экспериментальных данных показал, что коэффициенты взаимодиффузии данной системы лежат в пределах  $(2,5...3) \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ .

#### • Исследование взаимодиффузии в системе "хитозан — вода"

Кинетику массопереноса в модельной системе "хитозан — вода" исследовали на ЦГМИ с делением лазерного пучка по амплитуде (см. рис. 2). Предметом исследования служили водорастворимые пленочные образцы, полученные из биополимера хитозана. Выбор данного полимера обусловлен, прежде всего, широким применением хитозана в различных областях медицины, в частности в комбустиологии, стоматологии, хирургии и т. д.

Характеристика образца полимера: молекулярная масса 87 000, степень деацетилирования 83,6 %. Пленки получали методом полива 2 %-ного раствора полимера в 2 %-ной уксусной кислоте на горизонтальную полиэтиленовую подложку при комнатной температуре (время формования 48 ч). Характеристики свежесформованной пленки: хитозан в солевой форме, толщина —  $70 \pm 5 \text{ мкм}$ , влажность —  $18 \pm 2 \%$ .

Экспериментальная кювета для микроинтерферометра представляла собой две плоскопараллельные стеклянные пластинки. Образец пленки зажимали между стеклами и фиксировали кювету в спе-

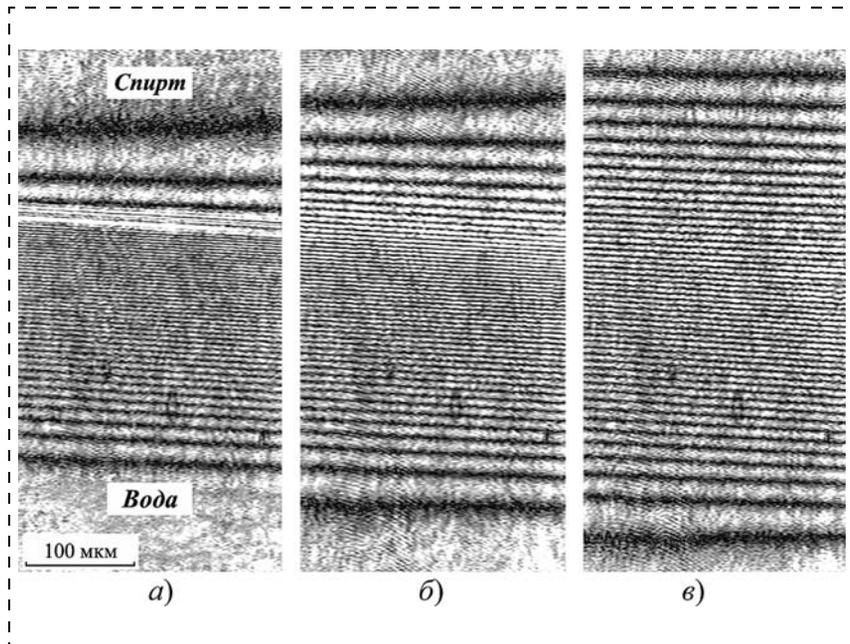


Рис. 4. Цифровые голографические интерферограммы процесса взаимодиффузии в различные моменты времени: а — 58 с; б — 124 с; в — 202 с

циальном зажиме. С помощью микрообъектива фокусировали на матрице фотокамеры изображение границы раздела пленка — воздух (рис. 6, а). Затем в образовавшийся воздушный зазор кюветы заливали воду. В ходе процесса вели непрерывную запись кадров цифровых голограмм.

На рис. 6 приведены цифровые голографические интерферограммы, соответствующие различным стадиям процесса взаимодиффузии компонентов в системе "хитозан—вода". В процессе массопереноса наблюдается появление интерференционных полос в области пленки, это свидетельствует о диффузии воды в полимер, что приводит к набуханию пленки (рис. 6, б). Конкурирующим процессом является растворение пленки, о чем свидетельст-

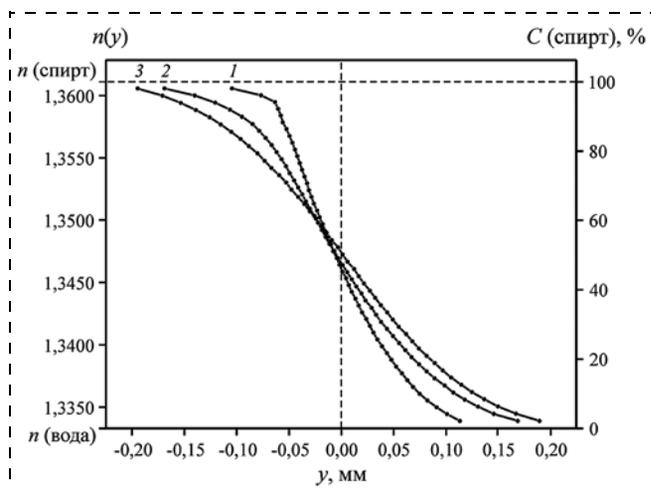


Рис. 5. Распределение показателя преломления  $n(y)$  и концентрации этилового спирта  $C(y)$  в ходе процесса диффузии: 1 — 58 с; 2 — 124 с; 3 — 202 с

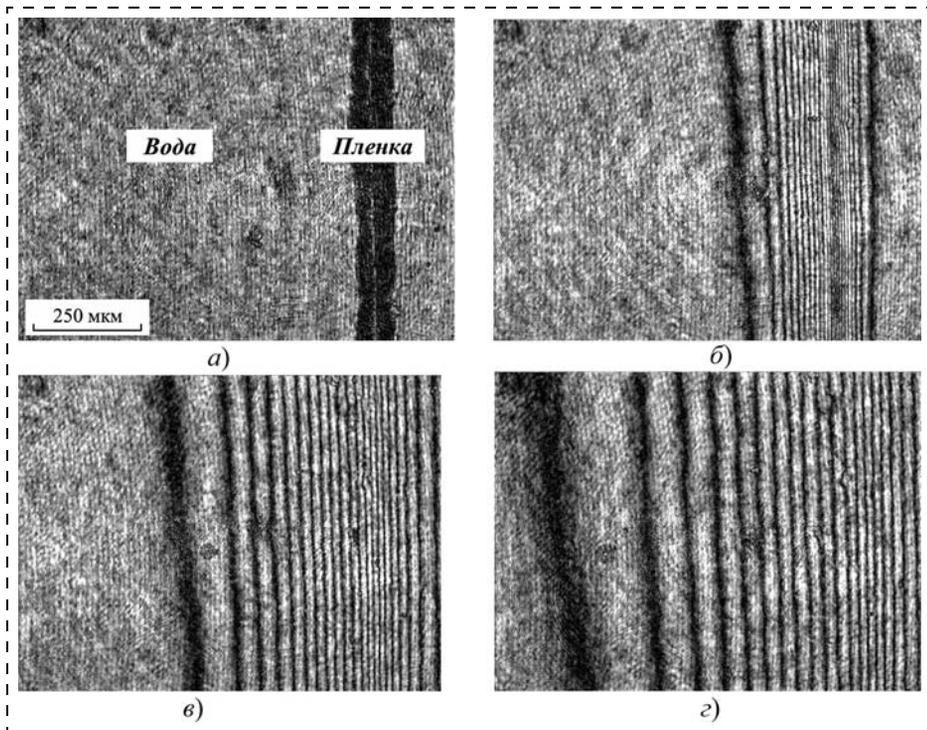


Рис. 6. Граница раздела "полимерная пленка — воздух" (а); интерферограммы, соответствующие различным временам диффузии компонентов системы "хитозан—вода": 10 с (б), 30 с (в), 90 с (г)

ует расширение интерференционной структуры в области воды (рис. 6, в, г).

По интерферограммам восстановлены концентрационные профили системы "хитозан — вода" в процессе взаимодиффузии (рис. 7). С течением времени происходит уширение зоны взаимодиффузии веществ.

Применение метода цифровой голографической микроинтерферометрии при анализе процесса взаимодиффузии компонентов в системе "этиловый спирт — вода" позволяет с высокой точностью оп-

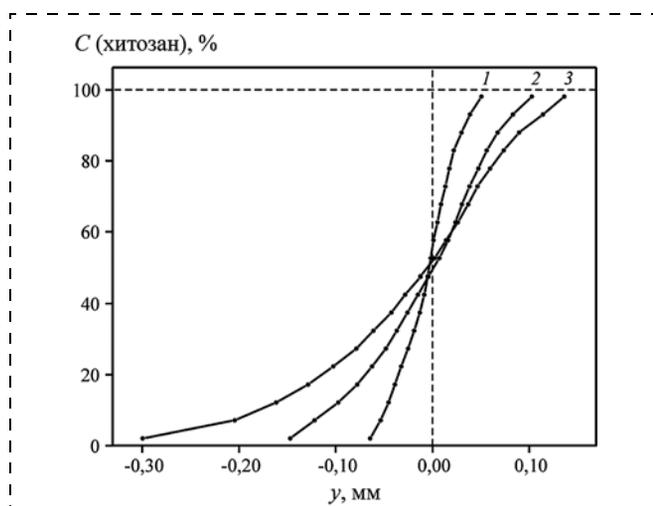


Рис. 7. Концентрационный профиль системы "хитозан—вода" в процессе взаимодиффузии компонентов: время диффузии 10 с (1), 30 с (2), 90 с (3)

ределять параметры массопереноса. При выборе корректных теоретических моделей возможно провести расчет диффузионных характеристик этой системы, спрогнозировать ее поведение при различных изменениях внешних условий.

Подходы, разработанные при исследовании массопереноса в модельной системе "хитозан — вода", могут быть применены в исследовании влияния природы низкомолекулярного вещества, молекулярной массы, структурно-морфологических особенностей высокомолекулярного компонента на диффузионные характеристики других практически важных систем полимер — низкомолекулярная жидкость (растворитель, осадитель, пластификатор), широко используемых в технологии получения пленок, мембран, полых волокон и др.

### Заключение

В рамках проведенных исследований разработаны новые схемные решения и программное обеспечение для цифровой голографической микроинтерферометрии прозрачных микрообъектов и сред технического и биологического происхождения.

Показано, что метод цифровой голографической микроинтерферометрии может успешно применяться для исследования диффузионных процессов в бинарных системах "твердое вещество — жидкость" и "жидкость I — жидкость II". В сравнении с классической лазерной интерферометрией в голографической интерферометрии осуществляется интерференция волн, проходящих по одному оптическому пути, в разные моменты времени. Поэтому характер картины интерференции обусловлен лишь изменениями микрообъема среды за время между экспозициями, что существенно облегчает их интерпретацию. Использование цифровой фоторегистрации и компьютерной обработки экспериментальных данных позволяет исследовать процессы диффузии в реальном времени и рассчитывать параметры массопереноса изучаемых систем.

Для достижения более высокого пространственного разрешения картины интерференционных полос при больших градиентах показателя преломления требуется применение высококачественных объективов с достаточно большим увеличением и высокой числовой апертурой.

Применение методов цифровой голографической интерферометрии для исследования кинети-

ки и динамики массопереноса веществ в бинарных средах позволяет, с одной стороны, использовать результаты интерференционных измерений для изучения диффузионных характеристик систем, механизма набухания и растворения компонентов, с другой — решать целый ряд практических задач. Например, прогнозировать диффузионную подвижность компонентов, оценивать молекулярные, фазовые, термодинамические и другие характеристики систем и материалов на их основе, что имеет важное практическое значение для целого ряда современных промышленных и медицинских технологий.

Повышение разрешающей способности и функциональных возможностей цифровой голографической микроинтерферометрии напрямую связано с развитием новых типов цифровых устройств фотоэлектрической записи оптических изображений, а также с усовершенствованием существующих алгоритмов обработки цифровых голограмм и голографических изображений. Перспективной видится реализация метода цифровой голографической томографии с восстановлением трехмерных изображений микрообъектов в реальном времени.

#### Список литературы

1. **Kreis T.** Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods. Wiley-VCH, 2005. 542 p.
2. **Бекетова А. К., Белозеров А. Ф., Березин А. Н.** и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
3. **Абрамов А. Ю., Диков О. В., Рябухо В. П., Шиповская А. Б.** Лазерные интерференционные измерения процессов взаимодиффузии в прозрачных средах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 1. С. 52—58.

4. **Малкин А. Я., Чалых А. Е.** Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения. М.: Химия, 1979. 303 с.
5. **Июffe Б. В.** Рефрактометрические методы в химии. Л.: Химия, 1983. 352 с.
6. **Хасбиуллин Р. Р., Бухтеев А. Е.** Микроинтерференция в исследовании взаимодиффузии в полимерных системах // Структура и динамика молекулярных систем. Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2004. С. 81—86.
7. **Протасов И. Г., Чалых А. Е., Хасбиуллин Р. Р.** Применение метода оптической интерферометрии для определения диффузии и растворимости лекарственных препаратов в полимерах // Тез. IV Всерос. Каргинской конф. М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 207.
8. **Schnars U.** Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction // Appl. Opt. 1994. V. 33. P. 179—181.
9. **Гусев М. Е., Воронин А. А., Гуревич В. С., Исаев А. М., Алексеенко И. В., Редкорчев В. И.** Методы цифровой голографической интерферометрии и их применение для измерения наноперемещений // Наносистемы: физика, химия, математика. 2011. Т. 2, № 1. С. 23—39.
10. **Клименко И. С.** Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 224 с.
11. **Schnars U., Jueptner W.** Digital Holography. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 164 p.
12. **Басараб М. А., Зелкин Е. Г., Кравченко В. Ф., Яковлев В. П.** Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера—Котельникова—Шеннона. М.: Радиотехника, 2004. 72 с.
13. **Котельников В. А.** О пропускной способности "эфира" и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук. 2006. № 7. С. 762—770.
14. **Диков О. В., Савонин С. А., Качула В. И., Рябухо В. П.** Цифровая голографическая интерферометрия микросмещений объектов с рассеивающей поверхностью // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, № 1. С. 51—64.
15. **Абрамов А. Ю., Рябухо В. П., Шиповская А. Б.** Исследование процессов растворимости и диффузии полимера методом лазерной интерферометрии // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, Вып. 12. С. 45—50.
16. **Абрамов А. Ю., Диков О. В., Рябухо В. П., Шиповская А. Б.** Исследование процессов взаимодиффузии в тонких прозрачных средах методами лазерной интерферометрии // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32, № 3. С. 253—264.

**S. A. Savonin**<sup>1</sup>, Chief Engineer, savonin@rambler.ru,

**A. Yu. Abramov**<sup>1</sup>, Senior Researcher, abramovay85@mail.ru,

**V. P. Ryabukho**<sup>1,2</sup>, Professor, Head of the Laboratory, rvp-optics@yandex.ru,

<sup>1</sup> Saratov State University, Saratov, <sup>2</sup> Institute of Precision Mechanics and Control RAS, Saratov

## Digital Holographic Interferometry of Mutual Diffusion Processes in the Transparent Medium

*Micro-objects and medium that are transparent to optical radiation, are widespread in the industry. Occurring in such media diffusion processes are of great practical importance for the analysis and separation of substances, research swelling processes, dissolution and fiber formation, development regulations processes.*

*A special level among the mass transfer research methods received interference methods with high sensitivity and makes it possible to monitor of fast processes in real time.*

*The scope of our study is to overcome the problems of qualitative and quantitative interpretation of interference patterns with a complex pattern of bands that formed in the study of ultrafast processes in transparent media. Was demonstrated that the joint use of microscopy, interferometry, holography and high-resolution photographs provides new possibilities in the study of phase micro-objects and microscopic processes.*

*Were developed device design and software for digital holographic micro-interferometry of transparent micro-objects and micro-medium. Shown that the method of digital holographic micro-interferometry can be used successfully for the study of diffusion processes in binary systems "solid — liquid" and "liquid I — liquid II".*

*Application of digital holographic interferometry in the study of the kinetics and dynamics of mass transfer in binary medium make possible to study the diffusion characteristics of the systems, mechanisms of swelling and dissolution of the components, to predict the diffusion mobility of components, to evaluate of molecular, phase and thermodynamic characteristics of systems. This has important practical signification for modern industrial and medical technologies.*

*Increasing the resolution and functionality of digital holographic micro-interferometry associated with the development of new digital optical recording devices and improvement of algorithms for digital holograms processing.*

**Keywords:** holographic interferometers, diffusion, mass-transfer, digital interferograms processing, Fourier-holograms, spatial filtering, refractive index distribution

## References

1. **Kreis T.** Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods. Wiley-VCH, 2005. 542 p.
2. **Beketova A. K., Belozherov A. F., Berezin A. N.** i dr. Golograficheskaya interferometriya fazovykh ob'ektov. L.: Nauka, 1979. 232 p.
3. **Abramov A. Yu., Dikov O. V., Ryabukho V. P., Shipovskaya A. B.** Lazernye interferentsionnye izmereniya protsessov vzaimodiffuzii v prozrachnykh sredakh. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2009. N. 1. P. 52—58.
4. **Malkin A. Ya., Chalykh A. E.** Diffuziya i vyazkost' polimerov. Metody izmereniya. M.: Khimiya, 1979. 303 p.
5. **Ioffe B. V.** Refraktometricheskie metody v khimii. L.: Khimiya, 1983. 352 p.
6. **Khasbiullin R. R., Bukhteev A. E.** Mikrointerferentsiya v issledovanii vzaimodiffuzii v polimernykh sistemakh. *Struktura i dinamika molekulyarnykh sistem*. Kazan': Izd-vo Kazanskogo gos. un-ta, 2004. P. 81—86.
7. **Protasov I. G., Chalykh A. E., Khasbiullin R. R.** Primenenie metoda opticheskoy interferometrii dlya opredeleniya diffuzii i rastvorimosti lekarstvennykh preparatov v polimerakh. *Tez. IV Vseros. Karginskoy konf.* M.: Izd-vo MGU, 2007. P. 207.
8. **Schnars U.** Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction. *Appl Opt.* 1994. V. 33. P. 179—181.
9. **Gusev M. E., Voronin A. A., Gurevich V. S., Isaev A. M., Alekseenko I. V., Redkorechev V. I.** Metody tsifrovoy golograficheskoy interferometrii i ikh primeneniye dlya izmereniya nanoperemeshcheniy. *Nanosistemy: fizika, khimiya, matematika*. 2011. Iss. 2, N. 1. P. 23—39.
10. **Klimenko I. S.** Golografiya sfokusirovannykh izobrazheniy i spekl-interferometriya. M.: Nauka, 1985. 224 p.
11. **Schnars U., Jueptner W.** Digital Holography. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 164 p.
12. **Basarab M. A., Zelkin E. G., Kravchenko V. F., Yakovlev V. P.** Tsifrovaya obrabotka signalov na osnove teoremy Uittekera—Koternikova—Shennona. M.: Radiotekhnika, 2004. 72 p.
13. **Kotel'nikov V. A.** O propusknoy sposobnosti "efira" i provoloki v elektrosvyazi. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2006. N. 7. P. 762—770.
14. **Dikov O. V., Savonin S. A., Kachula V. I., Ryabukho V. P.** Tsifrovaya golograficheskaya interferometriya mikrosmeshcheniy ob'ektov s rasseivayushchey poverkhnost'yu. *Komp'yuternaya optika*. 2012. V. 36, N. 1. P. 51—64.
15. **Abramov A. Yu., Ryabukho V. P., Shipovskaya A. B.** Issledovanie protsessov rastvorimosti i diffuzii polimera metodom lazernoy interferometrii. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2007. V. 77, Iss. 12. P. 45—50.
16. **Abramov A. Yu., Dikov O. V., Ryabukho V. P., Shipovskaya A. B.** Issledovanie protsessov vzaimodiffuzii v tonkikh prozrachnykh sredakh metodami lazernoy interferometrii. *Komp'yuternaya optika*. 2008. V. 32, N. 3. P. 253—264.

---

---

## Уважаемые авторы!

Сообщаем Вам, что в связи с подготовкой журнала "Мехатроника, автоматизация, управление" к включению в международные наукометрические базы данных редакция скорректировала требования к статьям и к сопровождающим их материалам, направляемым в адрес редакции. Просьба детально ознакомиться с новыми правилами и строго руководствоваться ими.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Материалы статьи должны соответствовать тематике журнала и содержать новые результаты исследований, не опубликованные ранее и не предназначенные к публикации в других печатных или электронных изданиях.

**Для опубликования статьи в редакцию журнала должны быть направлены следующие материалы:**

- рукопись статьи в DOC- и PDF-форматах;
- таблицы, иллюстрации и перечень подписанных подписей;
- сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученые степень и звание, должность, место работы, служебный и домашний адреса, телефоны и e-mail;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;
- англоязычная информация, содержащая данные статьи, необходимые для индексирования журнала в международных наукометрических базах данных.

**Англоязычная информация должна включать (согласно требованиям зарубежных аналитических баз данных) следующие данные:**

- инициалы и фамилии каждого автора, занимаемая должность, e-mail, место работы (при совпадении места работы авторов нужно указывать его один раз для всей группы авторов);
- название статьи;
- аннотация статьи объемом не менее 130 слов, написанная качественным английским языком, отражающая основное содержание статьи с указанием цели, задачи, результатов исследования и кратких выводов;
- ключевые слова, объемом 10—12 слов;
- список литературы в романском алфавите (латинице), т. е. необходимо транслитерировать на латинский шрифт (рекомендуем <http://translit.net/>) инициалы авторов, название источника публикации и место издания, а технические сокращения (номер, том, страница и т. п.) должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — N., том — V., страницы — P. и т. п.).

# ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



## Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 11  
ноябрь  
2014

**Главный редактор:**

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

**Ответственный секретарь:**

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСЕЕВ В. В.  
БАРАНОВ Л. А.  
БЕЛОКОНОВ И. В.  
БУКОВ В. Н.  
ВАСИЛЬЕВ В. И.  
ГОДУНОВ В. А.  
ГУРЕВИЧ О. С.  
ГУРСКИЙ Б. Г.  
ЕФИМОВ В. В.  
ЗАЙЦЕВ А. В.  
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.  
НЕСТЕРОВ В. А.  
ОХТИЛЕВ М. Ю.  
ПАНКРАТОВ В. М.  
РАСПОПОВ В. Я.  
САБО Ю. И.  
СТЕПАНОВ О. А.  
СОЛДАТКИН В. М.  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.  
ХИМЕНКО В. И.  
ЧЕБУРАХИН И. Ф.  
ШИРЯЕВ В. И.  
ШКОЛИН В. П.

**Редакция:**

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Парамонов П. П., Великанов А. В., Жаринов И. О.,  
Изергин К. М., Костишин М. О.**

Особенности построения подсистемы позиционирования на-  
шлемной системы авионики на основе оптико-инерциального  
принципа. . . . . 68

**П. П. Парамонов**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., postmaster@elavt.spb.ru,

**А. В. Великанов**<sup>2</sup>, ведущий инженер,

**И. О. Жаринов**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, зав.кафедрой, igor\_rabota@pisem.net,

**К. М. Изергин**<sup>1</sup>, аспирант, **М. О. Костишин**<sup>1</sup>, аспирант, maksim@kostishin.com

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО),

<sup>2</sup> ФГУП "Санкт-Петербургское ОКБ "Электроавтоматика" имени П. А. Ефимова"

## Особенности построения подсистемы позиционирования нацеленной системы авионики на основе оптико-инерциального принципа

*Рассматриваются особенности построения нацеленных систем целеуказания и индикации для авионики. Приводится сравнительный анализ (достоинства и недостатки) электромагнитного, инерциального и оптического принципов, положенных в основу существующей измерительной системы позиционирования нацеленных систем, определяющих направление линии визирования пилота летательного аппарата. В качестве перспективного для применения в нацеленных системах предлагается комбинированный подход на основе совмещения оптической и инерциальной составляющих. Приводится функциональная схема нацеленной системы целеуказания и индикации, состоящая из бортовой, носимой и нацеленной частей, и описание основных узлов.*

**Ключевые слова:** нацеленные системы целеуказания и индикации, авионика

### Введение

При создании перспективных летательных аппаратов (ЛА) большое внимание уделяется оснащению ЛА современным высокоточным и многофункциональным оптико-электронным и радиоэлектронным оборудованием, обеспечивающим выполнение возложенных на ЛА функциональных задач. К таким системам, в частности, относится нацеленная система целеуказания и индикации (НСЦИ). НСЦИ предназначена [1—7] для определения угловых координат линии визирования пилота по положению шлема (головы) и формирования в его поле зрения коллимированного изображения графической и телевизионной информации на фоне закабинного пространства. Система НСЦИ (рис. 1) обеспечивает:

- информационную поддержку пилота при выполнении полетного задания за счет обеспечения ситуационной осведомленности экипажа;
- повышение эффективности функционирования ЛА за счет сокращения времени принятия решения пилотом в процессе полета;

- придание ЛА свойств, обеспечивающих решение полетных задач в условиях широких углов наблюдения летчиком закабинного пространства.

В полете НСЦИ обеспечивает пилоту отображение в его поле зрения (непосредственно перед глазом) пилотажно-навигационной информации, в частности, информации о скорости движения летательного аппарата, соответствии скорости движения ЛА нормальной скорости разбега при старте или информации о командах на аварийное прекращение взлета и т. п. Основное достоинство НСЦИ перед предыдущими поколениями систем целеуказания (НСЦ) заключается в отображении пилоту динамической графической и телевизионной информации вместо неподвижного статического изображения. Для восприятия информации летчику не требуется "переключать" внимание на средства отображения приборной панели информационно-управляющего поля кабины.

При посадке НСЦИ обеспечивает информационную поддержку пилота при переходе фазы полета ЛА от "слепого" полета к визуальному полету с упреждением (до достижения высоты принятия решения о посадке без потери летчиком приборной информации о ходе полета).

Основные технологии, на основе которых сегодня создаются подсистемы позиционирования НСЦИ для эксплуатации в составе ЛА, следующие [8—13]:

- электромагнитная (преимуществом служит неограниченный диапазон измерений углов линии визирования; недостатком являются нестабильность работы, вы-



Рис. 1. Нацеленная система целеуказания и индикации разработки ФГУП "Санкт-Петербургское ОКБ "Электроавтоматика" имени П. А. Ефимова" (пример)

званная чувствительностью подсистемы позиционирования к влиянию электромагнитных помех, возникающих от работы бортового оборудования, и потребность подсистемы позиционирования в периодической перекалибровке);

- инерциальная (преимуществом также является неограниченный диапазон измерений углов линии визирования, причем подсистемы позиционирования, работающие на инерциальном принципе, не зависят от уровня внутрикабинных электромагнитных полей; недостатком являются необходимость предварительной калибровки подсистемы и рост ошибки позиционирования НСЦИ со временем полета ЛА);
- оптическая (преимуществом являются высокая точность позиционирования НСЦИ и стабильность характеристик от времени; недостатком являются ограниченный диапазон измерений углов линии визирования, обусловленный необходимостью нахождения источника излучения и приемника в зоне прямой видимости, и чувствительность к солнечным засветкам).

Основными разработчиками систем НСЦИ являются: Sextant Avionics (Франция), Kayser Electronics (США), Honeywell (США), Marconi Avionics (США), Elbit System (Израиль), ОАО "Арсенал" (Украина), Санкт-Петербургское ОКБ "Электроавтоматика" (Россия), применяющие в своих моделях систем НСЦИ только одну из указанных технологий. В связи с этим наиболее перспективной технологией создания НСЦИ является комбинированная (оптико-инерциальная) технология подсистемы позиционирования. Применение оптической составляющей в подсистеме позиционирования позволит обеспечить требования к точностным характеристикам системы позиционирования, а введение инерциальной составляющей позволит расширить углы позиционирования НСЦИ и исключить наличие "мертвых" зон, связанных с перекрытием оптического сигнала или воздействием интенсивной солнечной засветки. Периодическая синхронизация инерциальной подсистемы с оптической подсистемой позволит уменьшить ошибки в работе инерциальной подсистемы, возрастающие со временем работы. Обеспечение повышенных точностных характеристик позиционирования (до 10' в зоне работы оптической и парциальной подсистемы и до 30' в зоне работы только инерциальной подсистемы) требуется при работе НСЦИ в специальных режимах в течение достаточно короткого времени (4...6 мин).

Целью настоящей статьи является представление широкому кругу читателей проблематики проектирования и предлагаемых авторами конструктивных и схемотехнических решений по созданию подсистемы позиционирования НСЦИ и перспективных интегрированных НСЦИ в целом.

## 1. Принцип построения НСЦИ с оптико-инерциальной подсистемой позиционирования

НСЦИ представляет собой совокупность двух различных устройств:

- ♦ устройства определения положения защитного шлема, называемого подсистемой позиционирования, включающей
  - оптическую подсистему позиционирования (ОПС);
  - инерциальную подсистему позиционирования (ИПС);
  - бортовой вычислитель;
  - устройство управления;
- ♦ подсистемы индикации, включающей
  - оптическую систему;
  - датчик внешней освещенности (ДВО);
  - бортовой вычислитель;
  - устройство управления;
  - пульт управления;

конструктивно распределенных в составе трех компонентов: бортовой, носимой и нашлемной частей. Функциональная схема НСЦИ представлена на рис. 2.

Разделение НСЦИ на три компонента позволяет снизить нагрузку на шею пилота за счет перемещения части оборудования с защитного шлема в состав обмундирования пилота. Информационное взаимодействие носимой и бортовой частей осуществляется через разъемные соединения катапультируемого кресла летчика.

Бортовая часть НСЦИ включает в себя элементы оптической и инерциальной подсистем позиционирования, установленные либо на приборной панели информационно-управляющего поля, либо на конструктивных элементах кабины, а также пульт управления и бортовой вычислитель.

Основу носимой части составляют: приемопередатчик волоконно-оптической линии связи (ПРПВОЛС), по которой осуществляется передача графической и телевизионной информации, плата преобразования видеосигналов (ППВС) и плата управления.

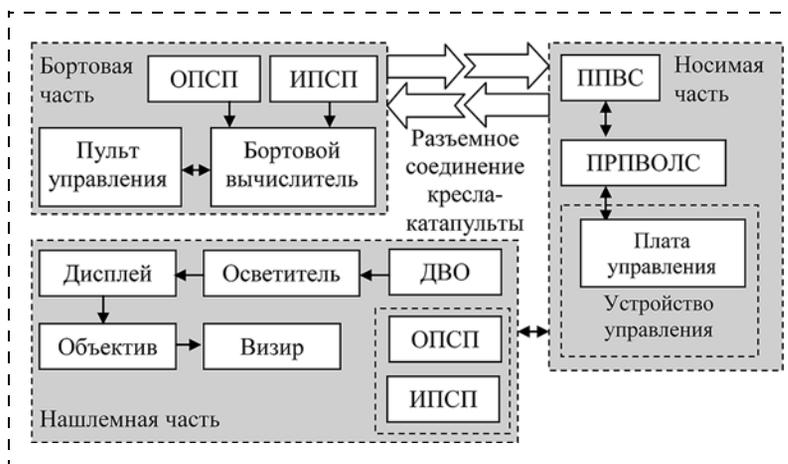


Рис. 2. Функциональная схема НСЦИ

Нашлемная часть НСЦИ состоит из оптической коллиматорной системы с проекционной матрицей (дисплеем), высокояркостным осветителем и объективом, обеспечивающей отображение на визире (перед глазом пилота) графической и телевизионной информации на фоне закабинного пространства, датчика ДВО, а также включает элементы инерциальной и оптической подсистем позиционирования.

Бортовая часть НСЦИ обеспечивает:

- прием от бортовых систем видеопотока пилотажно-навигационной информации и передачу в носимую часть для коллимирования изображения на визире;
- прием от носимой части НСЦИ сигналов, необходимых для работы ИПСП;
- совместную обработку информации об отклонениях элементов ИПСП, установленных на бортовой и нашлемной частях НСЦИ;
- передачу в носимую часть управляющих сигналов для светодиодных реперов (СДР) ОПСП;
- передачу в носимую часть управляющих сигналов для поддержания необходимого контраста индицируемой на визире информации в зависимости от сигналов датчика ДВО;
- выдачу углов направления линии визирования пилота.

Назначение носимой части НСЦИ заключается в преобразовании видеоданных для отображения на дисплее нашлемной части, в организации информационного взаимодействия нашлемной части с вычислителем бортовой части, фильтрации и формировании вторичных напряжений питания для нашлемной части.

Нашлемная часть обеспечивает формирование пилотажно-навигационной информации на визире непосредственно перед глазом пилота, измерение уровня внешней освещенности в поле зрения пилота, формирование реперных сигналов для работы ОПСП, а также сигналов ИПСП.

## 2. Оптическая и инерциальная подсистемы позиционирования НСЦИ

Функциональная схема оптической и инерциальной подсистем позиционирования НСЦИ приведена на рис. 3. Основное назначение ОПСП — определение и передача в бортовой вычислитель бортовой части НСЦИ сигналов углового позиционирования светодиодных реперов.

Назначение основных узлов подсистемы ОПСП:

- плата управления (ПУ-ПЗС) обеспечивает прием от ПЗС-матрицы видеоизображения, осуществляет поиск и обработку в видеопотоке образа светящихся реперов и оценку их угловых координат, обеспечивает комплексную обработку данных от ОПСП и ИПСП;
- устройство ввода—вывода (УВВ) обеспечивает информационное взаимодействие с бортовым вычислителем бортовой части (получение команд управления и передачу оцененных значений координат светящихся реперов);
- источник вторичного питания (ИВП) обеспечивает функциональные узлы НСЦИ вторичными напряжениями питания.

ИПСП представляет собой два набора по три одноосевых микрогироскопа (ООМкГ), выполненных по технологии микроэлектромеханических систем (поддерживаются и разрабатываются в Российской Федерации компанией ОАО "Гирооптика"), оси которых расположены вдоль осей системы координат НСЦИ. Одна группа ООМкГ располагается на элементах конструкции приборной панели информационно-управляющего поля, другая группа — на нашлемной части НСЦИ. Измерения от набора, закрепленного на приборной панели информационно-управляющего поля, являются опорными. В частном случае могут быть использованы также результаты измерения инерциальной системы ЛА, входящей в навигационный комплекс, при этом набор ООМкГ на приборной панели не требуется, однако точность работы такой системы будет существенно зависеть от времени полета.

Основные узлы ИПСП:

- одноосевой микрогироскоп (ООМкГ), выполненный на базе микросхемы однокоординатного микрогироскопа, содержащей

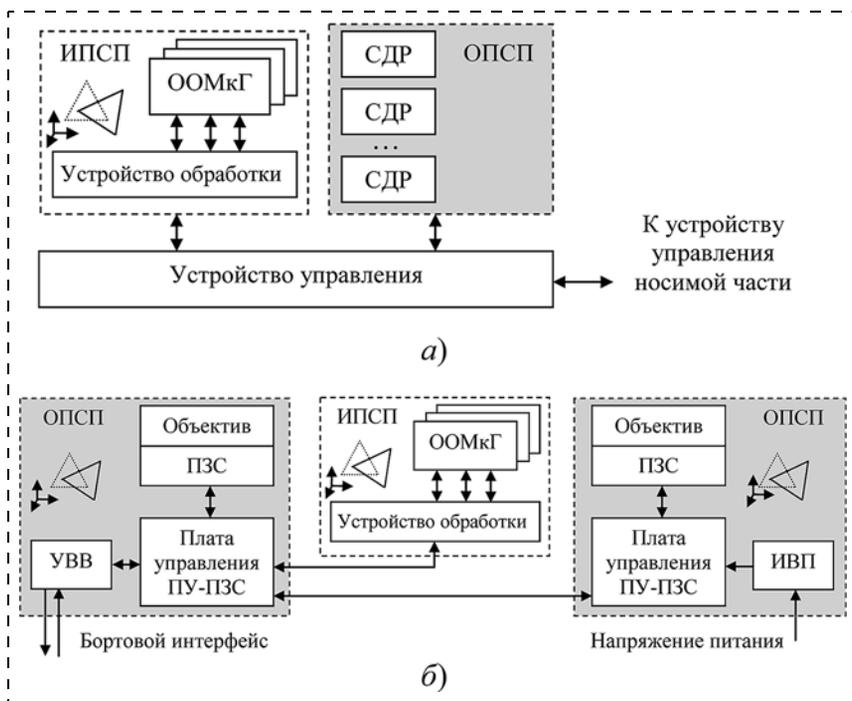


Рис. 3. Функциональная схема подсистем ОПСП и ИПСП для нашлемной части (а) и бортовой части НСЦИ (б)

чувствительный элемент и сигнальный процессор первичной обработки данных;

- устройство обработки, реализующее функцию вычислительного устройства, обеспечивающего цифровую обработку данных о вычисленных микрогироскопом углах разворота.

Обработка данных от ОПСП и ИПСП осуществляется в бортовом вычислителе. Определение направления линии визирования по данным от ОПСП осуществляется путем решения пространственной геометрической задачи по измеренным координатам светящихся реперов. Направление линии визирования по данным от ИПСП определяется путем анализа углового рассогласования между компонентами ИПСП, установленными на элементах конструкции приборной панели ЛА, и компонентами, установленными непосредственно на защитном шлеме.

Основной особенностью предлагаемой системы позиционирования на основе комбинированного метода является совместная обработка результатов измерений [14, 15] от оптической и от инерциальной подсистем, что позволяет обеспечить стабильную работу системы позиционирования НСЦИ с повышенной точностью (вместе существующих 45' — до 10...30') определения линии визирования в широком диапазоне углов поворота шлема.

### Заключение

К настоящему времени отечественным разработчикам удалось создать определенный технический задел, позволяющий приступить к решению наиболее актуальной задачи — обеспечению на борту функции целеуказания и индикации модернизируемых и принимаемых в эксплуатацию вертолетов и самолетов, что предполагает в ближайшей перспективе устойчивый спрос на эту продукцию. Дополнительные потребности в наשלемных системах связаны с широко проводимой в нашей стране модернизацией российской авиационной техники.

Проектирование наשלемных систем целеуказания и индикации как в нашей стране, так и за рубежом осуществляется не только для нужд авионики. Известны разработки наשלемных систем для различных промышленных устройств, игровых систем, обеспечивающих наблюдение "виртуального пространства" и др., в которых нашли широкое применение различные технологии позиционирования, использующие, как правило, высокочастотное магнитное поле (для определения линии визирования оценивается положение вектора напряженности магнитного поля).

Однако в бортовых условиях эксплуатации при воздействии электромагнитных помех и полей повышенной напряженности со случайной составляющей, а также при воздействии иных внешних

воздействующих факторов такие системы не способны обеспечить требуемые для практики точностные характеристики.

В связи с этим предлагаемые схемотехнические и конструктивные решения по совместной обработке оптических и инерциальных данных повысят точность определения направления линии визирования пилота.

### Список литературы

1. **Феофанов В. К., Парамонов П. П., Сулов В. Д., Сабо Ю. И.** Нашлемная система целеуказания и индикации на базе координаточувствительного фотоприемника "Мультискан" // Датчики и системы. 2001. № 8. С. 2—3.
2. **Филатов О. Г., Солдатенков В. А.** Электромагнитная система позиционирования для наשלемной системы целеуказания и индикации // Электроника: НТБ. 2003. № 5. С. 62—67.
3. **Шепета А. П., Жаринов И. О.** Перспективы применения в авиации интегрированных наשלемных систем нейрофизиологического контроля // Информационно-управляющие системы. 2003. № 6. С. 58—62.
4. **Парамонов П. П., Коморский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О.** Модернизация наשלемной системы НСЦИ для нейрофизиологического контроля состояния пилота летательного аппарата // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики. 2003. Вып. 11. С. 184—187.
5. **Гатчин Ю. А., Жаринов И. О.** Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики. М.: Машиностроение, 2010. 224 с.
6. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: Учеб. пособие // Информационно-управляющие системы. СПб: ГУАП, 2005. 144 с.
7. **Костяшкин Л. Н., Павлов О. В., Трофимов Д. В.** Проблемные аспекты разработки наשלемных систем целеуказания и индикации для вертолетов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 3. С. 57—63.
8. **Кучерявый А. А.** Бортовые информационные системы: Курс лекций / Под ред. В. А. Мишина и Г. И. Ключева. 2-е изд. перераб. и доп. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 504 с.
9. **Орлов В. С., Вольнов В. И., Казамаров А. А., Луканцев В. Н.** Нашлемная система целеуказания: Патент на полезную модель № 21168152 С1 RU, МПК G01S 5/00, № 2000128475/01. Заявл. 03.11.2000. Оpubл. 27.05.2001.
10. **Виленчик Л. С., Курков И. Н., Разин А. И., Розвал Я. Б., Титов А. А.** Нашлемная система целеуказания и индикации: Патент на полезную модель № 2202092 С1 RU, МПК F41G 3/00, № 2000121325/01, Заявл. 24.08.2000, Оpubл. 10.04.2003.
11. **Казамаров А. А., Луканцев В. Н.** Нашлемная система целеуказания, прицеливания и индикации: Патент на полезную модель № 2321813 С1 RU, МПК F41G 3/22, № 2007111240/02. Заявл. 28.03.2007. Оpubл. 10.04.2008.
12. **Солдатенков В. А., Грузевич Ю. К., Беликова В. Н., Ачильдиев В. М., Евсеева Ю. Н.** Способ определения ориентации шлема пилота и устройство наשלемной системы целеуказания и индикации: Патент на полезную модель № 2464617 С1 RU, МПК G05D 1/00, № 2010131685/08. Заявл. 28.07.2010. Оpubл. 10.02.2012.
13. **Георгадзе Г. Б., Рассветалов Л. А.** Ультразвуковая наשלемная система позиционирования: Патент на полезную модель № 2449242 С1 RU, МПК G01B 17/00, № 2010151938/28. Заявл. 17.12.2010. Оpubл. 27.04.2012.
14. **Филатов И. Ю.** Алгоритмы совместной обработки информации от бортовых источников летательного аппарата на основе логики взаимного расположения объектов: Дисс. канд. техн. наук: 05.13.11. Рязань: РГРТА, 2006. 199 с.
15. **Сулов В. Д., Шек-Иовсепяц Р. А., Видин Б. В., Жаринов И. О., Немолочмов О. Ф.** К вопросу об унификации бортовых алгоритмов комплексной обработки информации // Приборостроение. Известия вузов. 2006. Т. 49. № 6. С. 39—40.

**P. P. Paramonov**<sup>1</sup>, Professor, postmaster@elavt.spb.ru, **A. V. Velikanov**<sup>2</sup>, Leading engineer, **I. O. Zharinov**<sup>1</sup>, Head of Chair, Professor, igor\_rabota@pisem.net, **K. M. Izergin**<sup>1</sup>, Postgraduate student, **M. O. Kostishin**<sup>1</sup>, Postgraduate student iob.max@me.com,  
<sup>1</sup> Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,  
<sup>2</sup> SPb Scientific Design Bureau "Electroavtomatika" n. a. P. A. Efimova

## Features of Construction Helmet Subsystem Positioning System Based on Avionics Optical Inertial Principle

*The peculiarities of construction of perspective helmet-mounted target designation systems for avionics and display. The comparative analysis (strengths and weaknesses) of the electromagnetic, inertial and optical principles underlying the existing measuring system helmet-mounted positioning systems to guide the line of sight of the pilot of the aircraft. As promising for use in helmet-mounted system offers a combined approach based on a combination of optical and inertial component. The functional diagram of helmet-mounted target designation system and display, consisting of a board, helmet and worn parts. Descriptions of the main destination input nodes. The scheme of the measuring system of the helmet, constructed on the basis of the combined method of determining the direction of the line of sight several gauges running on heterogeneous physical principles. The main feature of this method is the co-processing of measurement results from optical and inertial subsystems in order to obtain more accurate than individually, assessing the angular position of the line of sight of the pilot.*

**Keywords:** helmet-mounted target designation system and display avionics

### References

1. **Feofanov V. K., Psramonov P. P., Suslov V. D., Sabo Yu. I.** Nashlemnaya sistema tseleukazaniya i indikatsii na baze koordinato-chuvstvitel'nogo fotopriemnika "Mul'tiskan". *Datchiki i sistemy*. 2001. N. 8. P. 2—3.
2. **Filatov O. G., Soldatenkov V. A.** Elektromagnitnaya sistema pozitsionirovaniya dlya nashlemnoy sistemy tseleukazaniya i indikatsii. *Elektronika: NTB*. 2003. N. 5. P. 62—67.
3. **Shepeta A. P., Zharinov I. O.** Perspektivy primeneniya v aviatсии integrirovannykh nashlemnykh sistem neyrofiziologicheskogo kontrolya. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. 2003. N. 6. P. 58—62.
4. **Paramonov P. P., Koporskiy N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O.** Modernizatsiya nashlemnoy sistemy NSTsI dlya neyrofiziologicheskogo kontrolya sostoyaniya pilota letatel'nogo apparata. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta tochnoy mekhaniki i optiki*. 2003. Iss. 11. P. 184—187.
5. **Gatchin Yu. A., Zharinov I. O.** Osnovy proektirovaniya vychislitel'nykh sistem integrirovannoy modul'noy avioniki. M.: Mashinostroenie, 2010. 224 p.
6. **Zharinov I. O., Zharinov O. O.** Bortovye sredstva otobrazheniya informatsii na ploskikh zhidkokristallicheskiykh panelyakh: Ucheb. posobie. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*. SPb: CUAP, 2005. 144 p.
7. **Kostyashkin L. N., Pavlov O. V., Trofimov D. V.** Problemyne aspekty razrabotki nashlemnykh sistem tseleukazaniya i indikatsii dlya vertoletov. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2009. N. 3. P. 57—63.
8. **Kucheryavy A. A.** Bortvye informatsionnye sistemy: Kurs lektsiy. Pod red. V. A. Mishina i G. I. Klyueva. 2-e izd. pererab. i dop. Ul'anovsk: UIGTU, 2004. 504 p.
9. **Orlov V. S., Vol'nov V. I., Kazamarov A. A., Lukantsev V. N.** Nashlemnaya sistema tseleukazaniya: *Patent na poleznyuyu model'* N. 21168152 S1 RU, MPK G01S 5/00, № 2000128475/01. Zayavl. 03.11.2000. Opubl. 27.05.2001.
10. **Vilenchik L. S., Kurkov I. N., Razin A. I., Rozval Ya. B., Titov A. A.** Nashlemnaya sistema tseleukazaniya i indikatsii: *Patent na poleznyuyu model'* № 2202092 S1 RU, MPK F41G 3/00. N. 2000121325/01, Zayavl. 24.08.2000, Opubl. 10.04.2003.
11. **Kazamarov A. A., Lukantsev V. N.** Nashlemnaya sistema tseleukazaniya, pritselivaniya i indikatsii: *Patent na poleznyuyu model'* N. 2321813 S1 RU, MPK F41G 3/22, N. 2007111240/02. Zayavl. 28.03.2007. Opubl. 10.04.2008.
12. **Soldatenkov V. A., Gruzevich Yu. K., Belikova V. N., Achil'diev V. M., Evseeva Yu. N.** Sposob opredelcnia orientatsii shlema pilota i ustroystvo nashlemnoy sistemy tseleukazaniya i indikatsii: *Patent na poleznyuyu model'* N. 2464617 S1 RU, MPK G05D 1/00, N. 2010131685/08. Zayavl. 28.07.2010. Opubl. 10.02.2012.
13. **Georgadze G. B., Rassvetalov L. A.** Ul'trazvukovaya nashlemnaya sistema pozitsionirovaniya: *Patent na poleznyuyu model'* N. 2449242 S1 RU, MPK G01B 17/00, N. 2010151938/28. Zayavl. 17.12.2010. Opubl. 27.04.2012.
14. **Filatov I. Yu.** Algoritmy sovместной obrabotki informatsii ot bortovykh istochnikov letatel'nogo apparata na osnove logiki vzaimnogo raspolozheniya ob'ektov: *diss. kand. tekhn. nauk*: 05.13.11. Ryzan': RGRТА, 2006. 199 p.
15. **Suslov V. D., Shck-Iovsepyants R. A., Vidin B. V., Zharinov I. O., Nemolochnov O. F.** K voprosu ob unifikatsii bortovykh algoritmov kompleksnoy obrabotki informatsii. *Priborostroenie. Izvestiya vuzov*. 2006. T. 49. N. 6. P. 39—40.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Дизайнер Т. Н. Погорелова.

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Т. В. Пчелкина.

Сдано в набор 01.09.2014. Подписано в печать 08.10.2014. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1114. 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.