

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

ТОМ 10, № 2
2017

Издательство Политехнического университета
Санкт-Петербург
2017

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Председатель

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН;

Редакционный совет:

Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;

Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор;

Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;

Заборовский В.С., д-р техн. наук, профессор;

Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;

Фотиади А.Э., д-р физ.-мат. наук, профессор;

Черноруцкий И.Г., д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Редакционная коллегия:

Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Ицыксон В.М., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. *Philippe Ferrari*, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Клавдиев В.Е., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. *Wolfgang Krautschneider*, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Кучерявый Е.А., канд. техн. наук, профессор, Tampere University of Technology, Finland.

Dr. *Fa-Long Luo*, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. *Emil Novakov*, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Трифонов П.В., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Шкодыврев В.П., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия.

Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» ISSN 1994-2354.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory», в базах данных Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, Math-Net.Ru, ProQuest, Index Copernicus

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 552-62-16.

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



**ST. PETERSBURG STATE
POLYTECHNICAL UNIVERSITY
JOURNAL**

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

**VOLUME 10, No. 2
2017**

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2017

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

EDITORIAL COUNCIL

Head of the editorial council

Prof. Dr. *Rafael M. Yusupov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences)

Members:

Prof. Dr. *Sergey M. Abramov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Dmitry G. Arseniev*,

Prof. Dr. *Vladimir V. Voevodin* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Vladimir S. Zaborovsky*,

Prof. Dr. *Vladimir N. Kozlov*,

Prof. Dr. *Alexandr E. Fotiadi*,

Prof. Dr. *Igor G. Chernorutsky*.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

Prof. Dr. *Alexander S. Korotkov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Members:

Prof. Dr. *Alexandr V. Babkin*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir M. Itsykson*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Philippe Ferrari*, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir E. Klavdiev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Yevgeni Koucheryavy*, Tampere University of Technology, Finland.

Prof. Dr. *Wolfgang Krautschneider*, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Dr. *Fa-Long Luo*, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Prof. Dr. *Sergey B. Makarov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Emil Novakov*, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Prof. Dr. *Viacheslav P. Shkodyrev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Peter V. Trifonov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Igor A. Tsikin*, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Sergey M. Ustinov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

The journal is published under scientific and methodical guidance of the Russian Academy of Sciences since 1995. The journal is published since 2008 as part of the periodical edition «Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU» (ISSN 1994-2354).

The journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals and other editions to publish major findings of PhD theses for the research degrees of Doctor of Sciences and Candidate of Sciences.

The journal is indexed by Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, EBSCO, ProQuest, Index Copernicus, VINITI RAS Abstract Journal (Referativnyi Zhurnal), VINITI RAS Scientific and Technical Literature Collection, Russian Science Citation Index (RSCI) database © Scientific Electronic Library and Math-Net.ru databases.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). Certificate ПИ № ФС77-51457 issued Oct. 19, 2012.

No part of this publication may be reproduced without clear reference to the source.

The views of the authors can contradict the views of the Editorial Board.

The address: 195251 Polytekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

Содержание

Робототехника и мехатроника

Харузин С.В., Шмаков О.А. Основные тенденции и перспективные решения в области разработки задающих манипуляционных систем	7
Харузин С.В., Иванов А.А., Шмаков О.А. Система управления автономным движением транспортного средства с активно трансформируемой рамой	22
Моторин Д.Е., Попов С.Г., Курочкин Л.М. Алгоритм разрешения коллизий при планировании движения группы роботов в условиях пространственно-ситуационной неопределённости	32

Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

Егоров Е.В., Малышев В.М. Экранированная колебательная система опорного СВЧ-генератора с торцевым возбуждением дискового диэлектрического резонатора	45
Цикин И.А., Поклонская Е.С. Обработка сигналов системы вторичной радиолокации на удаленном пункте контроля	58

Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

Шишигин Д.С., Шишигин С.Л. Шаговые алгоритмы расчета волновых процессов в задачах грозозащиты электрических подстанций	75
---	----

Contents

Robotics and Mechatronics

Kharuzin S.V., Shmakov O.A. <i>Main Trends and Promising Solutions in Haptics</i>	7
Kharuzin S.V., Ivanov A.A., Shmakov O.A. <i>Autonomous Control System for a Vehicle with Actively Transformable Frame</i>	22
Motorin D.Ye., Popov S.G., Kurochkin L.M. <i>An Algorithm for Collision Avoidance in Path Planning for a Group of Robots in a Spatio-Situational Indeterminacy</i>	32

Circuits and Systems for Receiving, Transmitting and Signal Processing

Egorov E.V., Malyshev V.M. <i>Oscillating System of a Reference Microwave Generator with Screened Dielectric Resonator Excited from an End Face</i>	45
Tsikin I.A., Poklonskaya E.S. <i>Secondary Surveillance Radar Signals Processing at the Remote Analysis Station</i>	58

Simulations of Computer, Telecommunications, Control and Social Systems

Shishigin D.S., Shishigin S.L. <i>Step Algorithms for Wave Processes Calculation in Problems of Lightning Protection at Electric Power Substations</i>	75
---	----

DOI: 10.18721/JCSTCS.10201

УДК 621.865.8

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ЗАДАЮЩИХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

С.В. Харузин¹, О.А. Шмаков²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

²Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники
и технической кибернетики, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Приведена классификация задающих манипуляционных систем (ЗМС) по типу кинематической схемы и характеру механического взаимодействия с оператором. Приведен структурированный обзор перспективных исследовательских и коммерчески доступных ЗМС общего и специального назначения. По результатам проведенной работы составлены и приведены обобщающие выводы.

Ключевые слова: манипулятор; силовое ощущение; задающие манипуляционные системы; мехатроника; робототехника; экзоскелет.

Ссылка при цитировании: Харузин С.В., Шмаков О.А. Основные тенденции и перспективные решения в области разработки задающих манипуляционных систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 7–21. DOI: 10.18721/JCSTCS.10201

MAIN TRENDS AND PROMISING SOLUTIONS IN HAPTICS

S.V. Kharuzin¹, O.A. Shmakov²

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

²State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC),
St. Petersburg, Russian Federation

The main objective of this paper is to provide a comprehensive and highly structured review of promising research and commercial solutions in haptics. The subject of the presented review is small- and human-sized haptic devices, emerged mainly in the past ten years. This paper consists of three main sections. First section provides classification of haptic systems. Two classification criteria are considered. The first criterion is the kinematics type of the haptic device and the other is the principle of interaction of the device's mechanical parts and human operator. Based on the suggested classification, four categories of haptic devices is presented: continuous devices, parallel devices, exoskeleton devices and combined devices. The second section provides a review of research and commercially available haptic devices developed for general and special usage. The final section provides generalized conclusions.

Keywords: manipulator; haptic feedback; master-slave systems; mechatronics; robotics; exoskeleton.

Citation: Kharuzin S.V., Shmakov O.A. Main trends and promising solutions in haptics. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 2, Pp. 7–21. DOI: 10.18721/JCSTCS.10201

Введение

Задающие устройства, используемые в системах телеуправления средствами робототехники, можно условно распределить по двум группам.

К устройствам первой группы относятся джойстики, задающие рукоятки, клавиатуры и т. п. Информация об изменении состояния какого-либо элемента таких устройств (об отклонении рукоятки, нажатии кнопки и т. п.) преобразуется в движение исполнительных систем объекта управления. В простейшем случае каждый управляющий элемент соотнесен с одной базовой функцией управляемой системы. Усложнение кинематики или расширение набора функций исполнительного устройства приводит к увеличению количества управляющих элементов и/или привязке нескольких функций к одному элементу. Использование управляющих устройств, перегруженных функциональными элементами, приводит к увеличению когнитивной рабочей нагрузки на оператора и снижает эффективность его работы [1]. К устройствам второй группы относятся т. н. задающие манипуляционные системы (ЗМС).

В издаваемой отечественной и зарубежной литературе под ЗМС понимается устройство ввода или совокупность устройств ввода, состоящих из конструктивно объединенных механизмов и устройств – управляющих органов, состояние которых отображается на состоянии управляемого объекта. Включение в состав ЗМС обратных силовых, тактильных или вибрационных связей позволяет снабдить оператора информацией о конфигурации объекта управления (ОУ) и возмущающих воздействиях, прикладываемых к его исполнительным системам со стороны окружающей среды. Такие системы обладают низким уровнем негативного воздействия на работоспособность оператора, имеют интуитивно понятную структуру и позволяют выполнять задачи, требующие одно-

временного неавтоматического скоординированного движения нескольких ОУ.

Цель настоящей работы – составление структурированного обзора перспективных или активно используемых в робототехнике решений в области создания задающих манипуляционных систем. Ниже приведена классификация задающих манипуляционных систем. Затем рассмотрены перспективные исследовательские и коммерчески доступные ЗМС общего и специального назначений.

Классификация задающих манипуляционных систем

Разрабатываемые ЗМС по типу кинематической схемы и характеру механического взаимодействия с оператором можно условно разделить на четыре группы: 1) ЗМС последовательной структуры; 2) параллельной структуры; 3) экзоскелетного типа; 4) гибридные ЗМС.

В составе конструкций ЗМС первых двух типов можно выделить неподвижное основание, поддерживающую систему и подвижную платформу. Неподвижное основание используется для размещения манипулятора на специально подготовленном стенде или на произвольной опорной поверхности. Как правило, разработчики стремятся расположить в основании все активные подсистемы манипулятора. Поддерживающие системы используются для соединения неподвижного основания и подвижной платформы с сохранением необходимого количества ее степеней свободы. В их состав входят одна или несколько цепей из звеньев, попарно образующих кинематические пары различного уровня. Подвижная платформа жестко соединена с задающей рукояткой и в ряде случаев конструктивно объединена с ней. Под задающей рукояткой подразумевается элемент ЗМС, ориентация, положение и конфигурация которого отображаются на состоянии ОУ. Через задающую рукоятку оператор непосредственно получает все тактильные

ощущения и ощущения, связанные с эффектом отраженного усилия.

Второй группой признаков, по которым можно произвести деление задающих систем по группам, является количество точек, через которые оператор взаимодействует с рабочей средой. Существующие разработки можно отнести к системам с одной контактной точкой и к системам с несколькими контактными точками. В первую группу входят манипуляторы последовательного типа и подавляющее большинство манипуляторов параллельного типа. Ко второй группе принадлежат ЗМС экзоскелетного и часть систем гибридного и параллельного типов.

По подходу к реализации эффекта отраженного усилия, представленные в литературе разработки можно разделить на две группы: системы с ситуационным силовым очувствлением и системы с полным силовым очувствлением.

В системах, построенных в соответствии с первым подходом, усилия к звеньям ЗМС

прикладываются только при наличии контакта ОУ и элементов окружающей среды. В системах с полным силовым очувствлением усилия к звеньям ЗМС прикладываются постоянно, вне зависимости от наличия контакта ОУ и элементов рабочей среды.

ЗМС последовательной структуры

ЗМС последовательной структуры в составе своей поддерживающей системы имеют только одну разомкнутую цепь из звеньев. Как правило, такие манипуляторы позволяют ориентировать и позиционировать задающую рукоятку в угловой (схема ВВВ) или цилиндрической (схема ВПП) системах координат. Для снижения негативного воздействия собственных инерциальных и гравитационных сил, возникающих при перемещении задающей рукоятки манипулятора, разработчики стремятся расположить все активные подсистемы в неподвижном основании и на первом звене манипулятора. Однако это не всегда возможно, особенно при обеспечении силового очувствления

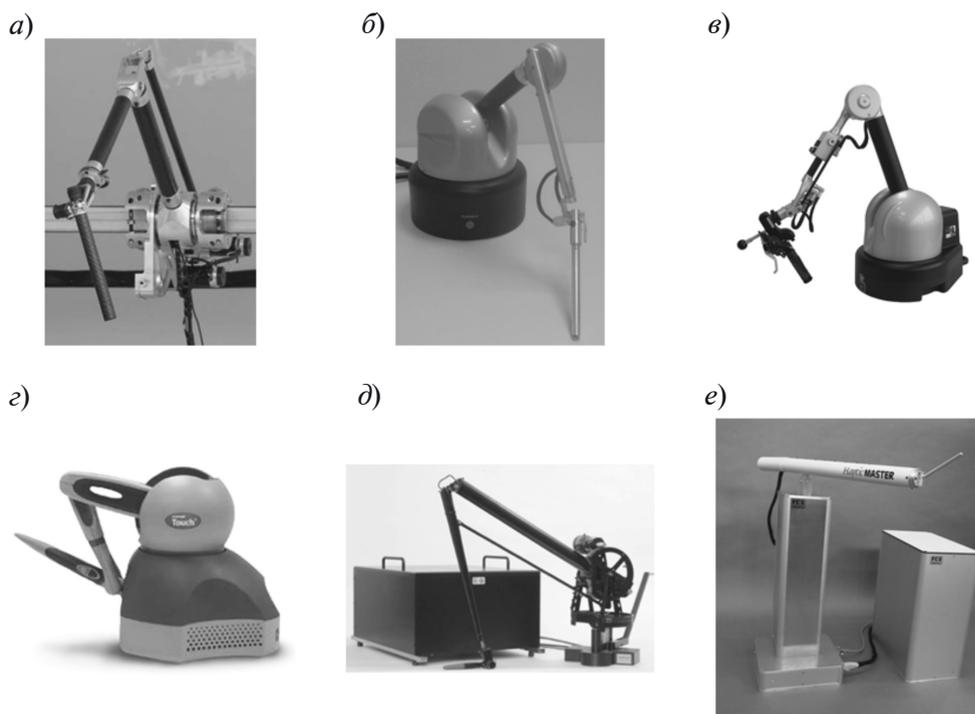


Рис. 1. Фотографии ЗМС LHifAM (а); Virtuouse 3D Desktop (б); Haption Virtuouse 6D TAO (в); Geomagic Touch (г); PHANTOM (д); HapticMaster (е)

Fig. 1. Haptic devices LHifAM (a), Virtuouse 3D Desktop (b), Haption Virtuouse 6D TAO (c), Geomagic Touch (d), PHANTOM (d), HapticMaster (e)

ориентирующих степеней подвижности задающей рукоятки. Поэтому в состав механической системы манипуляторов нередко включаются компенсирующие пассивные механизмы (пружины, противовесы), а в их вычислительные устройства внедряются активные компенсирующие алгоритмы.

Разработка задающих манипуляторов последовательной структуры является хорошо исследованной областью. В коммерческом секторе представлено множество робастных технических решений, используемых на производствах и во время исследований. Фотографии некоторых ЗМС последовательной структуры, рассмотренных ниже, приведены на рис. 1.

Представленный в [2] прототип ЗМС предназначен для управления удаленным манипулятором, масса которого значительно превосходит массу задающего устройства. Прототип состоит из шести попарно соединенных модулей, первые пять из которых составляют поддерживающую систему устройства, а последний является задающей рукояткой. ЗМС обладает относительно большой рабочей областью и позволяет ориентировать задающую рукоятку в широком диапазоне углов, однако размещение приводов в основании каждого модуля привело к увеличению массы звеньев и, как следствие, к увеличению инерциальных сил, возникающих при выполнении рабочих операций. Необходимость жесткого механического крепления первого модуля ЗМС к опорной поверхности сужает диапазон возможного применения устройства.

Задающая система LNI_fAM [3, 4] разработана испанским некоммерческим исследовательским институтом CEIT в рамках проекта по расширению возможностей персонала, занятого техническим обслуживанием реактивных двигателей самолетов. Механическая система LNI_fAM состоит из двух компонентов: собственно манипулятора, обладающего двумя позиционирующими и тремя ориентирующими степенями подвижности, и напольной системы, состоящей из двух вертикальных направляющих и закрепленной между ними горизонтальной направляющей. Манипулятор крепится на горизонтальной направляющей, вслед-

ствие чего оператор способен осуществлять его перемещение в вертикальной плоскости. Активные системы ЗМС обеспечивают формирование отраженных усилий только по трем позиционирующим степеням подвижности.

Одна из компаний, вносящих значительный вклад в исследования в области телеуправления, эргономического обеспечения производств и манипулирования объектами виртуальной реальности посредством ЗМС, – французская компания Haption [5]. Haption является дочерней фирмой CEA (French Nuclear Research Agency) и входит в сообщества European Association for Virtual Reality и French Association of Virtual Reality. Основное направление деятельности компании – разработка ЗМС в производственных, образовательных и исследовательских целях. Модельный ряд компании представлен тремя семействами настольных и крупногабаритных ЗМС: Haption Desktop, Haption Virtuoise 6D и Haption Mat 6D [6]. Ниже рассмотрены задающие системы первых двух семейств.

Устройства семейства Haption Desktop представлены двумя моделями: Virtuoise 3D Desktop [7] и Virtuoise 6D Desktop [8]. Поддерживающая система манипуляторов характеризуется тремя вращательными степенями подвижностями, позиционирующими рабочий орган, и тремя степенями подвижностями, ориентирующими его. Задающая рукоятка ЗМС Haption Virtuoise 3D Desktop не оснащена приводами. Поэтому наибольший интерес в качестве интерфейсного решения при телеуправлении представляет задающий манипулятор Haption Virtuoise 6D Desktop, активная система которого формирует вращающие моменты по трем ориентирующим степеням задающей рукоятки. Устройства обладают относительно большой рабочей зоной по сравнению с другими настольными системами. При этом максимальная величина усилий, прикладываемых к их задающим рукояткам, невелика – порядка 10 Н.

Семейство Haption Virtuoise 6D представлено тремя устройствами, разработанными непосредственно для использования при телеуправлении: Haption Virtuoise

6D Standard [9], Haption Virtuoise 6D TAO [10] и Haption Virtuoise 6D High Force [11]. Устройства обладают более мощными приводами по сравнению с устройствами серии Haption Virtuoise 3D Desktop и оснащены приводами, формирующими усилия по всем степеням подвижности манипуляторов. Все рассматриваемые ЗМС оснащены задающими рукоятками с программируемыми кнопками. Задающий манипулятор Haption Virtuoise 6D Standard является базовым устройством рассматриваемого семейства. На его основе построены модификации High Force и TAO. Модификация High Force предназначена для телеуправления с широким диапазоном значений отраженных усилий. ЗМС Haption Virtuoise 6D TAO обладает эргономичной рукояткой с расширенным функционалом.

Деятельность компании Geomagic [12] направлена на разработку ЗМС общего назначения и сопровождающего программного обеспечения. Область применения производимых компанией задающих интерфейсов включает в себя научно-исследовательскую деятельность, работы с компьютерной графикой, трехмерное моделирование и скульптуру, а также телеуправление и дополненное эффектом отраженного усилия взаимодействие с объектами виртуальной реальности. Модельный ряд производимых Geomagic устройств представлен двумя семействами ЗМС: Touch и PHANTOM.

ЗМС семейства Touch предназначены главным образом для работ по созданию виртуальных скульптур. Все устройства имеют три степени подвижности, по каждой из которых обеспечивается эффект отраженного усилия. Ввиду ориентированности устройств на художественные работы, силового очувствления вращающихся степеней подвижности задающих рукояток не предусмотрено. Устройства обладают достаточно малыми значениями отраженных усилий – до 7,9 Н и малыми габаритами рабочего пространства. Модель Geomagic Touch обладает относительно низкой ценой и высокой точностью определения координат задающей рукоятки, вследствие чего особенно популярна у исследователей при разработке систем телеуправления и систем

взаимодействия с элементами виртуальной реальности [13].

Устройства серии PHANTOM предназначены для использования при проведении исследований в области разработки систем телеуправления. Устройства обладают большей рабочей зоной по сравнению с устройствами семейства Touch, имеют приводы, формирующие эффект отраженного усилия по трем переносным степеням подвижности и, в зависимости от оснащения, по трем ориентирующим степеням подвижности.

Одной из активно используемых в машиностроении и легкой промышленности ЗМС является коммерчески доступная система HapticMaster [14, 15]. Устройство представляет собой задающий манипулятор последовательного типа, построенный в соответствии со схемой РПП. Обратное очувствление в системе обеспечивается только по трем позиционирующим степеням задающей рукоятки. Устройство использует схему управления, при которой оператор прикладывает усилия к задающей рукоятке, которые затем преобразуются в движение исполнительных систем объекта управления. HapticMaster обладает относительно большой величиной формируемого отраженного усилия – порядка 250 Н.

ЗМС параллельной структуры

В состав поддерживающей системы ЗМС параллельной структуры входит несколько цепей звеньев, соединенных с общей подвижной платформой. Замкнутая структура параллельных ЗМС обуславливает большие показатели жесткости таких устройств, а также малый уровень воздействия инерционных сил на их задающие рукоятки. Параллельные ЗМС обеспечивают необходимую избыточность, робастность и возможность активной реконфигурации рабочего пространства непосредственно во время функционирования. Наиболее распространенной схемой построения ЗМС параллельной структуры, представленной в публикуемой литературе и среди коммерчески доступных моделей, является схема модифицированного дельта-механизма, прямая и обратная задачи кинематики и

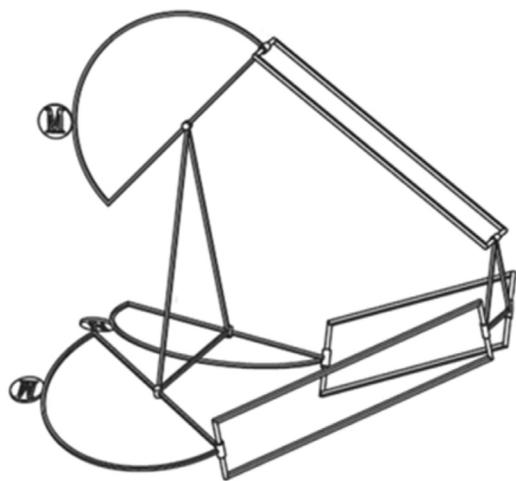


Рис. 2. Схематическое изображение манипуляционной платформы, построенной в соответствии со схемой модифицированного дельта-механизма

Fig. 2. Schematical illustration of a manipulator that is built based on the modified delta-mechanism scheme

динамики для которого решены в [16]. Схематическое изображение манипуляционной платформы, построенной в соответствии со схемой модифицированного дельта-механизма, приведено на рис. 2.

Фотографии некоторых ЗМС параллельной структуры, рассмотренных ниже, приведены на рис. 3.

ЗМС VirtuaPower [17] разработана в рамках проекта по созданию кооперативной системы телеуправления с несколькими задающими и одним исполнительным устройством. Поддерживающая система прототипа сформирована из двух параллельных пятизвенных механизмов, связанных с общими основанием и рукояткой. Активные подсистемы ЗМС формируют отраженные усилия по трем переносным и трем ориентирующим степеням свободы. Все приводы за исключением последнего – связанного с третьей ориентирующей степенью задающей рукоятки – расположены

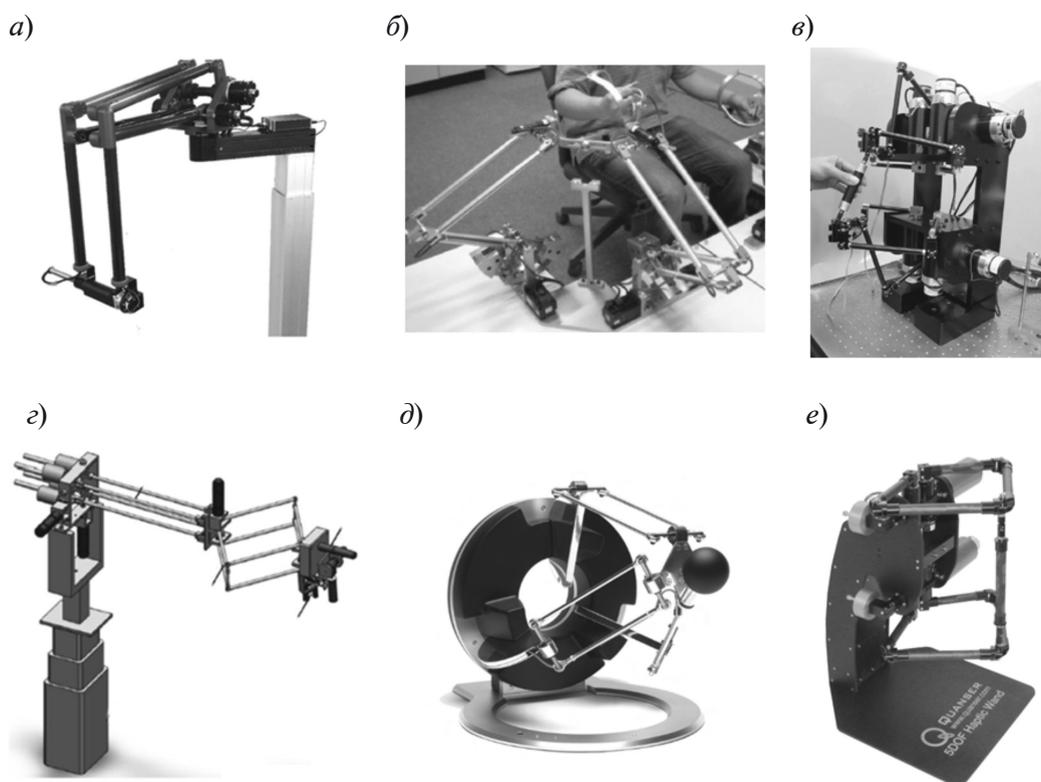


Рис. 3. Фотографии ЗМС VirtuaPower (а), DELTA-R (б), комбинированной ЗМС [24] (в), ЗМС, представленной в [25] (г), Omega.3 (д), 5-DOF Haptic Wand (е)

Fig. 3. Haptic devices VirtuaPower (a), DELTA-R (b), hybrid device [24] (c), haptic device [25] (d), Omega.3 (d), 5-DOF Haptic Wand (e)

в основании и на первом звене. ЗМС обладает относительно большими габаритными размерами и большой рабочей зоной. Размещение устройства при этом возможно только на специально подготовленном неподвижном основании.

Авторами работы [18] приведено описание прототипа параллельной ЗМС DELTA-R, построенной в соответствии с модифицированной схемой дельта-механизма. Особенностью рассматриваемого устройства является сопоставимость его габаритов и размеров рабочей области. В состав базового варианта устройства входит неподвижное основание, два поддерживающих механизма, подвижная платформа и задающая рукоятка – резиновая сфера. Кинематика ЗМС позволяет только позиционировать его задающую рукоятку.

В работе [19] авторы описали макет задающего манипулятора общего назначения и подход к оптимизации его массогабаритных параметров. ЗМС построена в соответствии со схемой дельта-механизма: выходные звенья поддерживающих механизмов соединены с подвижной платформой посредством пассивных сферических шарниров. Все приводы устройства расположены в его основании, что обуславливает малое влияние собственных инерций звеньев поддерживающей системы на величину возмущающих усилий, возникающих при смещении подвижной платформы.

Другим примером задающего манипулятора, параметры механической части которого подвергались предварительной оптимизации, является устройство, представленное в [20]. ЗМС предназначено для взаимодействия с элементами виртуальной реальности. Особенностью устройства является его конструкция: в состав его поддерживающей системы входит три пантографных механизма, связанных с подвижной платформой. При этом с каждой цепью звеньев пантографа связан отдельный привод.

Описание манипулятора, представляющего собой комбинацию из двух манипуляционных систем параллельной структуры приведено в работах [21, 22]. В состав каждой манипуляционной системы входит

по три двухзвенных механизма. Выходные звенья механизмов связаны с рукояткой посредством двухступенных пассивных универсальных шарниров. Кинематика рассмотренной системы позволяет изменять только пять координат задающей рукоятки, две из которых характеризуют ориентацию. Для того чтобы обеспечить управление третьей ориентирующей степенью свободы, рукоятка крепится к универсальным шарнирам посредством винтовой передачи. Таким образом, при вращении рукоятки места крепления механизмов поддерживающей системы взаимно удаляются.

Манипуляционная система параллельной структуры с тремя позиционирующими и тремя ориентирующими степенями подвижности, а также дополнительной степенью, обусловленной наличием схвата, рассмотрена в работе [23]. Все приводы (в т. ч. участвующие в обеспечении обратных силовых связей по степени подвижности схвата) расположены в основании устройства. В состав манипулятора входит основание, восемь ног и механизм схвата, интегрированный в механическую структуру ЗМС. Ноги ЗМС попарно установлены на каждой из четырех граней основания. Каждая нога состоит из двух звеньев. Первое звено соединено с основанием посредством одностепенного активного шарнира, ко второму звену оно крепится посредством двухступенного пассивного шарнира.

ЗМС [24] представляет собой комбинацию из двух параллельных механизмов и предназначена для управления мобильными роботами, оснащенными манипуляторами. Нижний параллельный механизм состоит из неподвижного основания, трех цепей звеньев и подвижной платформы. При этом оси вращения всех шарниров механизма параллельны, что позволяет позиционировать задающую рукоятку и верхний параллельный механизм в горизонтальной плоскости. Второй механизм построен в соответствии со схемой дельта-механизма и способен осуществлять вертикальное перемещение и разворот в горизонтальной плоскости относительно подвижной платформы первого механизма.

Отличительной особенностью манипу-

лятора [25] является его оснащенная схватами для трех пальцев оператора задающая рукоятка. К каждому из схватов со стороны исполнительной системы ЗМС возможно приложение независимых усилий. Это позволяет реализовать управление исполнительным устройством через три контактные точки. Основание манипулятора состоит из трех попарно скользящих друг в друге профилей, относительно которых может смещаться поддерживающая система. Посредством смещения поддерживающей системы и изменения высоты ее крепления возможна реконфигурация рабочей зоны ЗМС непосредственно во время выполнения рабочих операций.

ЗМС **Novint Falcon** предназначен для использования как в научно-исследовательских и производственных целях, так и при выполнении задач общего назначения (например, в качестве рабочего органа при взаимодействии с графическими редакторами, пакетами 3D-моделирования и игровыми приложениями). Устройство разработано американской компанией **Novint** [26]. С момента основания главными направлениями деятельности компании являлись разработка и производство ЗМС специального назначения для предприятий, занятых в автомобильной и авиакосмической отрасли. Однако в рамках кампании по расширению рынка потребителей **Novint** инициировала разработку общедоступной ЗМС нового поколения. Результатом трёхлетней разработки стал задающий манипулятор **Novint Falcon**. Конструкция **Novint Falcon** отличается от конструкций других манипуляторов, построенных в соответствии со схемой модифицированного дельта-механизма. Оси вращения шарниров рассматриваемой ЗМС, соединяющих подвижную платформу и выходные звенья поддерживающих механизмов, ориентированы не к центру окружности, проведенной через центры шарниров, а по ребрам треугольника, вписанного в нее. Манипулятор обладает небольшими габаритами и малыми максимальными значениями формируемых отраженных усилий.

Одним из лидеров в производстве и разработке высокоточных задающих систем

для телеуправления в медицине и индустриальных отраслях является швейцарская компания **Force Dimension** [27]. Все производимые **Force Dimension** устройства представляют собой ЗМС параллельного типа, построенные в соответствии со схемой модифицированного дельта-механизма. Модельный ряд [28] задающих манипуляторов **Force Dimension** представлен устройствами трёх семейств: **Delta.X**, **Omega.X** и **Sigma.X**. В рамках одного семейства манипуляторы различаются формой и функционалом задающих рукояток.

Поддерживающая система базовой платформы семейства **Omega.X** включает в себя три цепи звеньев, приводимых в движение посредством тросовых передач, соединенных с установленными в основании устройства приводами. Все необходимые кинематические вычисления устройства семейства **Omega.X** производят непосредственно на борту, предоставляя станции управления уже обработанную информацию. В качестве задающей рукоятки **Omega.3** используется резиновая сфера, на которой расположена одна программируемая кнопка. Устройство **Omega.6** обладает задающей рукояткой-пером, на которой также расположена одна программируемая кнопка. При этом в состав рукоятки не входят активные компоненты. Рукоятка **Omega.7** оснащена активным рычагом, позволяющим управлять схватной степенью подвижности объекта управления, и способна осуществлять вращение относительно подвижной платформы по трем степеням подвижности.

ЗМС **Force Dimension Delta.X** представляют собой результат дальнейшей работы по улучшению эргономических характеристик и расширению рабочей области манипуляторов серии **Omega.X**. Устройства семейства **Delta.X** имеют такую же кинематическую схему, и в их состав входят те же конструктивные компоненты, что и в состав манипуляторов серии **Omega.X**. Отличие между устройствами двух семейств заключается в длинах звеньев и в наличии пассивного шарнира, расположенного в основании ЗМС **Delta.X**. Шарнир обеспечивает вращение основания манипулятора от 0° (горизонтальная ориентация) до 90°

(вертикальная ориентация), что позволяет использовать его в более широком диапазоне условий применения.

Серия *Sigma.X* представлена только одним устройством – *Sigma.7*. ЗМС имеет семь степеней подвижности (три позиционирующие, три ориентирующие и одну схватную). Все степени подвижности обеспечены приводами отраженных усилий. Рукоятка ЗМС оснащена одной программируемой кнопкой. Устройство обладает меньшей погрешностью определения положения задающей рукоятки по сравнению с ЗМС серии *Omega.X* и *Delta.X* и предназначено преимущественно для использования в качестве задающего манипулятора в медицинских системах телеуправления.

Основными направлениями деятельности компании Quanser [29] являются разработка и производство испытательных стендов средств мобильной робототехники, стендов, наглядно поясняющих основные принципы теории управления в робототехнических системах, вибрационных испытательных стендов, а также систем интерфейсных решений для телеуправления в научных, образовательных и производственных целях. Клиентами компании являются порядка 2500 образовательных и исследовательских учреждений. Среди всех производимых Quanser продуктов можно выделить три задающие системы.

Первой системой является *Twin-Pantograph 3-DOF Haptic Interface*. ЗМС предназначен для телеуправления и манипулирования виртуальными объектами с использованием технологий дополненной реальности. В качестве поддерживающих механизмов в устройстве использована пара пантографов. Центры шарниров, соединяющих противоположные системы рычагов в рамках одного пантографа, соединены жестким звеном. Звено способно неограниченно вращаться относительно мест его крепления. Перемещение звена при этом возможно только в горизонтальной плоскости.

Второй производимой Quanser ЗМС является *5-DOF Haptic Wand* [30]. Поддерживающая система манипулятора состоит из двух пантографов, входные звенья кото-

рых крепятся к неподвижному основанию посредством систем из пар активных шарниров с ортогональными осями вращения, вследствие чего задающая рукоятка манипулятора имеет пять степеней свободы: три поступательных и две вращательные.

Наибольшим числом степеней подвижности из всех предлагаемых Quanser ЗМС обладает устройство *HDI High Definition Haptic Device*. В состав поддерживающей системы ЗМС входят два последовательных манипулятора, установленных параллельно. Каждый манипулятор имеет три степени подвижности. Оба манипулятора закреплены на общем неподвижном основании, их последние звенья соединены задающей рукояткой. Для всех шести степеней свободы обеспечивается формирование отраженных усилий.

ЗМС экзоскелетного типа

Одним из активно развивающихся направлений в области создания задающих манипуляционных систем является разработка и исследование возможностей устройств экзоскелетного типа. Сенсоры и приводы обратных силовых связей в таких системах закрепляются непосредственно на операторе. Фотографии некоторых ЗМС экзоскелетного типа приведены на рис. 4.

Разработанная в Токийском университете задающая система *Kento* [31] представляет собой оснащенный приводами отраженного усилия костюм, надеваемый на верхнюю половину тела оператора. Устройство предназначено как для непосредственного телеуправления демонстрационным антропоморфным роботом *Kojiro* [32], так и для его обучения различным движениям. По результатам проведенного анализа авторы пришли к выводу, что наиболее применимыми исполнительными элементами для передачи усилий от ОУ на мускульно-скелетную систему оператора является система т. н. «мышечных элементов». «Мышечный элемент» состоит из защитного корпуса, привода, системы блоков и связанной с ними посредством троса пружины. Переменное сопротивление движениям оператора формируется за счет активного сжатия и распрямления пружины.

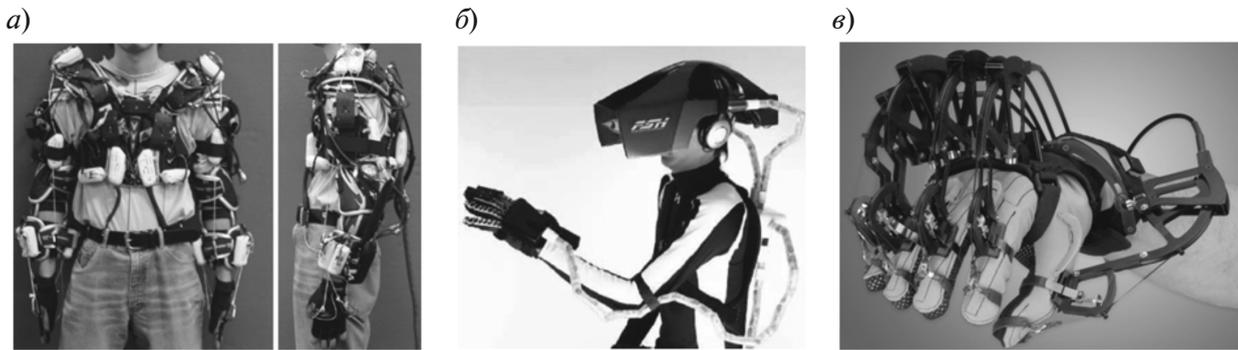


Рис. 4. Фотографии ЗМС Kento [31] (а), ЗМС с сенсорными трубками, представленной в [33] (б), CyberGrasp (в)

Fig. 4. Kento [31] (a), haptic exoskeleton [33] (b), CyberGrasp (c)

В работе [33] рассмотрена задающая система-костюм с тактильными обратными связями. Система предназначена для телеуправления антропоморфным роботом. В состав системы входят шлем трехмерной реальности, рюкзак с вычислительным устройством и аккумуляторами, а также пара перчаток. В большой, указательный и средний пальцы каждой перчатки встроены вибрационные моторы. Ориентация и положение рук и головы оператора определяется с помощью гибких сенсорных трубок, соединенных с рюкзаком. Каждая трубка представляет собой последовательность звеньев, соединенных универсальными шарнирами, углы взаимной ориентации которых измеряются потенциометрами. Ввиду сложности сопоставления координат элементов конечностей оператора и конечностей робота, а также ввиду отсутствия обратных связей по усилию, разработка не показала высокой эффективности при выполнении манипуляций предметами с помощью обеих рук.

Авторами [34] рассмотрена ЗМС, используемая при реализации двустороннего телеуправления в условиях значительной асимметрии между задающей и исполнительной системами. ЗМС представляет собой трехпальцевую перчатку-экзоскелет. Перчатка состоит из трех последовательных механизмов. В состав каждого механизма входит пять пассивных и один активный шарнир, установленный в основании каждого «пальца». Отраженное усилие форми-

руется посредством подачи вращающего момента на первое звено пальца. Величина усилия измеряется установленным в основании одностепенным датчиком силы.

Лидером в производстве коммерческих экзоскелетных решений для телеуправления является компания CyberGlove Systems [35]. Основное направление деятельности компании – разработка и производство ЗМС экзоскелетного и гибридного типов с обратными тактильными и силовыми связями. Модельный ряд CyberGlove Systems представлен тремя семействами ЗМС: CyberGlove, CyberGrasp и CyberForce.

CyberGlove – это семейство экзоскелетных ЗМС, выполненных в виде перчатки. Устройства предназначены главным образом для обеспечения оператора информацией о взаимодействии с объектами виртуальной реальности, однако, при использовании соответствующих методов отображения координат возможно применение таких устройств и при телеуправлении. В состав перчатки входят от 18 до 22 тензорезистивных датчиков (в зависимости от версии устройства), определяющих конфигурацию и ориентацию кисти оператора относительно его предплечья.

CyberGrasp представляет собой комбинацию исполнительной манипуляционной системы (ИМС) и устройства CyberGlove II. ИМС необходима для формирования эффекта отраженного усилия при манипуляции виртуальными объектами, телеуправлении, а также удаленной реабилитации.

ИМС состоит из пяти одинаковых механизмов с регулируемыми геометрическими параметрами (по механизму на один палец). Каждый механизм приводится в движение посредством натяжения троса. Устройство обеспечивает обратные связи по усилию в размере до 12 Н. При этом оно обладает относительно большой массой: порядка 450 г без учета массы аккумуляторов.

CyberForce представляет собой комбинацию CyberGrasp и последовательного манипулятора гибридной структуры. Манипулятор имеет шесть степеней подвижности, по каждой из которых обеспечивается отраженное усилие. Подробный анализ кинематики и динамических параметров устройства проведен в [36].

ЗМС гибридного типа

Гибридные манипуляторы представляют собой устройства, в механической системе которых конструктивно объединены элементы ЗМС параллельной и последовательной структур. К ним относятся как манипуляторы с гибридной поддерживающей системой, так и манипуляторы с разными типами задающей и поддерживающей систем. Наиболее распространенным вариантом является совмещение поддерживающей системы параллельного типа и задающей рукоятки последовательного типа. В ряде случаев в состав гибридной схемы входят элементы манипуляторов последовательной

и/или параллельной структуры (используемые в качестве исполнительных систем ЗМС) и элементы экзоскелетных манипуляторов (используемые в качестве системы датчиков, закрепленных непосредственно на операторе). Фотографии рассмотренных ниже ЗМС гибридного типа приведены на рис. 5.

ЗМС общего назначения iFeel3 [37] предназначена главным образом для обогащенного силовыми и вибрационными обратными связями взаимодействия с элементами виртуальной реальности через одну контактную точку. Механическая система устройства состоит из неподвижного основания, пантографа и задающего пера-рукоятки. Пантограф соединен с неподвижным основанием посредством двух активных шарниров с перпендикулярными осями вращения и способен вращаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Элементы параллельного механизма обеспечивают частичную пассивную компенсацию сил тяжести, действующих на первые два звена задающего манипулятора. Устройство обладает малыми габаритами и относительно малой рабочей областью. При этом производимое им максимальное отраженное усилие позволяет определять наличие взаимодействия ОУ с элементами рабочей среды с достаточной степенью достоверности.

Задающая система [38] состоит из па-

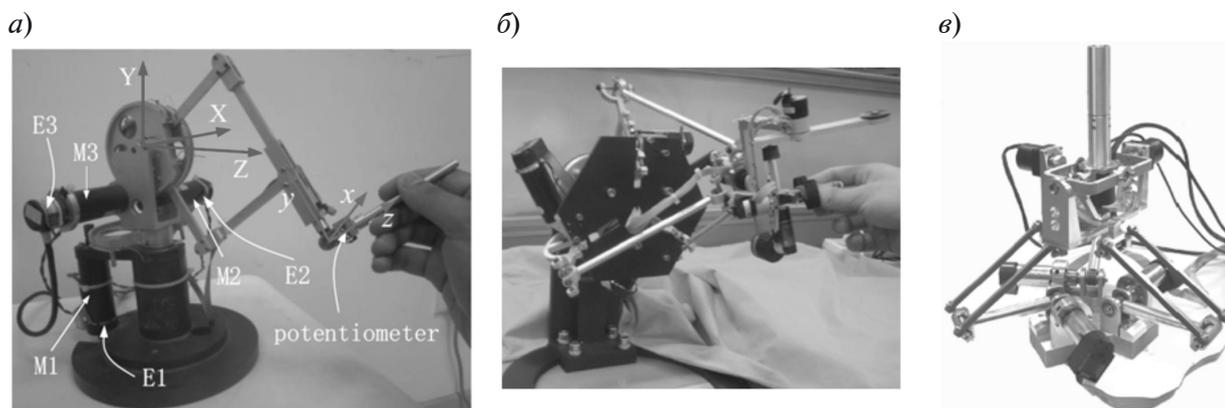


Рис. 5. Фотографии ЗМС iFeel3 (а), медицинской ЗМС, представленной в [38] (б), модульной ЗМС [39] (в)

Fig. 5. iFeel3 (a), medical haptic device [38] (b), modular haptic device [39] (c)

раллельной платформы и задающей рукоятки последовательной структуры, интегрированной в механическую систему ЗМС. Манипулятор предназначен для телеуправления высокоточными исполнительными манипуляторами, в т. ч. медицинскими. Параллельный поддерживающий механизм ЗМС построен в соответствии с модифицированной схемой дельта-механизма и используется для позиционирования задающей рукоятки. Последовательная составляющая поддерживающего механизма построена в соответствии со схемой ВВВ и используется для ориентирования задающей рукоятки.

В работе [39] представлена компактная модульная ЗМС параллельно-последовательной структуры. Система состоит из платформы параллельной структуры и пятизвенного последовательного механизма, используемого в качестве задающей рукоятки. Авторы отмечают, что основным требованием к разработке ЗМС являлось расширение функциональных возможностей устройств, построенных по схеме дельта-механизма, за счет расширения диапазона допустимых углов ориентации задающей рукоятки и обеспечения возможности отработки ее высокочастотных движений. В состав устройства входит параллельный механизм, двухстепенной универсальный механизм и одностепенной механизм. Параллельный механизм обеспечивает позиционирование задающей рукоятки, а два последующих механизма — ее ориентирование.

Заключение

В статье рассмотрены отличительные особенности ЗМС, принадлежащих к классам последовательных, параллельных, экзоскелетных и гибридных манипуляторов. Манипуляционные платформы последовательной структуры обладают сравнительно простыми кинематическими схемами и компактными размерами исполнительных систем. Однако при увеличении показателей жесткости конструкции габаритные размеры таких ЗМС значительно увеличиваются.

Большей жесткостью конструкции и относительно малыми размерами обладают ЗМС параллельной структуры, но такие системы имеют достаточно сложные кинематические схемы, и их применение связано с использованием методов отображения физического рабочего пространства манипулятора на физическое рабочее пространство ОУ и обратно посредством введения связующего виртуального рабочего пространства.

ЗМС экзоскелетного типа являются эргономичными решениями, обеспечивающими необходимый интуитивный базис при взаимодействии между оператором и ОУ, однако к ним предъявляются высокие требования по обеспечению точности определения состояния управляющих элементов. Гибридные ЗМС совмещают достоинства и недостатки включенных в их состав типовых подсистем. При построении таких систем, как правило, используется модульный подход.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cannon D. Perceived mental workload and operator performance of dexterous manipulators under time delay with master-slave interfaces // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications. 2015.
2. Xuewen R. Design of a Force Feedback Teleoperation Master Manipulator // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Information and Automation. Nairar, China, 2014.
3. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС LHIfAM // URL: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/control1/LHIfAM.pdf> (Дата обращения: 03.10.2016).
4. Borro D. A Large Haptic Device for Aircraft Engine Manipulability. IEEE, 2004.
5. Официальный сайт компании Haption // URL: <http://www.haption.com/site/index.php/en/company-profile-menu-en> (Дата обращения: 03.10.2016).
6. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС Haption MAT 6D // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Mat_6D.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).
7. Интернет-ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения Haption Virtuouse 3D Desktop // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_3DDesktop.pdf

(Дата обращения: 03.10.2016).

8. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения Haption Virtuouse 6D Desktop // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6DDesktop.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).

9. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения Haption Virtuouse 6D Standard // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_Standard.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).

10. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения Haption Virtuouse 6D TAO // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_TAO.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).

11. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения Haption Virtuouse 6D High Force // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_HF.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).

12. Официальный сайт компании Geomagic // URL: <http://www.geomagic.com/en/products-landing-pages/haptic> (Дата обращения: 03.10.2016).

13. **Quan-Zen A.** Multipoint Haptic Mediator Interface for Robotic Teleoperation // IEEE Systems Journal. 2015. Vol. 9. No. 1.

14. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС HapticMaster // URL: [http://www.vrlab.ctw.utwente.nl/eq/Documentation/HapticMaster_HM_ProductSheet%20\(final\).pdf](http://www.vrlab.ctw.utwente.nl/eq/Documentation/HapticMaster_HM_ProductSheet%20(final).pdf) (Дата обращения: 03.10.2016).

15. **Van der Linde R.Q.** The HapticMaster, a new high-performance haptic interface // URL: <http://people.cs.vt.edu/~wangr06/touch%20review%20organization/VanLFR02.pdf>.

16. **Hao J.** Kinematic and Static Analysis of a Cable-driven 3-DOF Delta Parallel Mechanism for Haptic Manipulators // Proc. of the 34th Chinese Control Conf. Hangzhou, China, 2015.

17. **Giuk L.** A Novel Haptic Device with High-force Display Capability and Wide Workspace // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, Sweden, 2016.

18. **Junpei A.** Haptic Device Using a Newly Developed Redundant Parallel Mechanism // IEEE Transactions on Robotics. 2011. Vol. 27. No. 2.

19. **Sung-Uk L.** Analysis and Optimal Design of a New 6-DOF Parallel Type Haptic Device // Proc. of the IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China, 2006.

20. **Jung W.Y.** Optimum design of 6-DOF parallel manipulator with translational/rotational workspaces for haptic device application // J. of

Mechanical Science and Technology. Springer, 2010.

21. **Minh H.V.** A New 6-DOF Haptic Device for Teleoperation of 6-DOF Serial Robots // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2011. Vol. 60. No. 11

22. **Vu M.H.** Tele-operation of a 6-DOF Serial Robot Using a New 6-DOF Haptic Interface // 2010 IEEE Internat. Symp. Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE).

23. **Lambert P.** A Novel Parallel Haptic Device with 7 Degrees of Freedom // 2015 IEEE World Haptics Conf. (WHC). Evanston, IL, USA, Northwestern University, 2015.

24. **Dongseok R.** Development of a six DOF haptic master for teleoperation of a mobile manipulator // Mechatronics. Elsevier, 2009.

25. **Huanhuan Q.** Design and Calibration of a New 6-DOF Haptic Device // Sensors. 2015. No. 11.

26. Официальный сайт компании Novint // URL: <http://www.novint.com/index.php/novintfalcon> (Дата обращения: 02.10.2016).

27. Официальный сайт компании Force Dimension // URL: <http://www.forcedimension.com/company/about> (Дата обращения: 03.10.2016).

28. Электронный ресурс со спецификациями продуктов компании Force Dimension // URL: <http://www.forcedimension.com/products> (Дата обращения: 03.10.2016).

29. Официальный сайт компании Quanser // URL: <http://www.quanser.com/> (Дата обращения: 03.10.2016).

30. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения 5-DOF Haptic Wand // URL: http://www.quanser.com/Products/Docs/74/5DOF_Haptic_Wand.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).

31. **Kazuo H.** Development of Bilateral Wearable Device "Kento" for Control Robots Using Muscle Actuator Modules // Proc. of the 18th IEEE Internat. Symp. on Robot and Human Interactive Communication. Toyama, Japan, 2009.

32. **Ikuo M.** An Advanced Musculoskeletal Humanoid Kojiro // Proc. of the IEEE-RAS Internat. Conf. on Humanoid Robotics. 2007.

33. **Yosuke M.** Operation Assist for a Teleoperated Robot System Controlled with a Lightweight and High-Operable Master Device // IEEE/SICE Internat. Symp. on System Integration (SII). Meijo University, Nagoya, Japan, 2015.

34. **Brygo A.** Synergy-Based Interface for Bilateral Tele-manipulations of a Master-Slave System with Large Asymmetries // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation

(ICRA). Stockholm, Sweden, 2016.

35. Официальный сайт компании CyberGlove Systems // URL: <http://www.cyberglovesystems.com> (Дата обращения: 08.10.2016).

36. **Martínez-Terran G.** CyberForce Haptic Device: Kinematics and Manipulability // Proc. of the Internat. Conf. on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering.

37. **Chaobin L.** iFeel3: a Haptic Device for Virtual Reality Dental Surgery Simulation //

Статья поступила в редакцию 01.11.2016

REFERENCES

1. **Cannon D.** Perceived mental workload and operator performance of dexterous manipulators under time delay with master-slave interfaces. *Proceeding of the IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*, 2015.

2. **Xuwen R.** Design of a Force Feedback Teleoperation Master Manipulator. *Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation*, Hailar, China, 2014.

3. **ZMS LHfAM.** Available: <http://www4.tecnun.es/assignaturas/control1/LHfAM.pdf> (Accessed: 03.10.2016).

4. **Borro D.** *A Large Haptic Device for Aircraft Engine Manipulability*. IEEE, 2004.

5. **Haption.** Available: <http://www.haption.com/site/index.php/en/company-profile-menu-en> (Accessed: 03.10.2016).

6. **ZMS Haption MAT 6D.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Mat_6D.pdf (Accessed: 03.10.2016).

7. **Haption Virtuouse 3D Desktop.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_3DDesktop.pdf (Accessed: 03.10.2016).

8. **Haption Virtuouse 6D Desktop.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6DDesktop.pdf (Accessed: 03.10.2016).

9. **Haption Virtuouse 6D Standard.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_Standard.pdf (Accessed: 03.10.2016).

10. **Haption Virtuouse 6D TAO.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_TAO.pdf (Accessed: 03.10.2016).

11. **Haption Virtuouse 6D High Force.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_HF.pdf (Accessed: 03.10.2016).

12. **Geomagic.** Available: <http://www.geomagic.com/en/products-landing-pages/haptic> (Accessed: 03.10.2016).

13. **Quan-Zen A.** Multipoint Haptic Mediator Interface for Robotic Teleoperation. *IEEE Systems*

Proc. of the Internat. Conf. on Virtual Reality and Visualization. 2011.

38. **Hongmin W.** Design of a Novel Serial and Parallel Force Feedback Master Manipulator // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Biomimetics. Tianjin, China, 2010.

39. **Masaru U.** Design of a Compact 6-DOF Haptic Device to Use Parallel Mechanisms // URL: <http://robots.stanford.edu/isrr-papers/final/final-15.pdf> (Дата обращения: 02.10.2016).

Journal, 2015, Vol. 9, No. 1.

14. **ZMS HapticMaster.** Available: [http://www.vrlab.ctw.utwente.nl/eq/Documentation/HapticMaster_HM_ProductSheet%20\(final\).pdf](http://www.vrlab.ctw.utwente.nl/eq/Documentation/HapticMaster_HM_ProductSheet%20(final).pdf) (Accessed: 03.10.2016).

15. **Van der Linde R.Q.** *The HapticMaster, a new high-performance haptic interface*. Available: <http://people.cs.vt.edu/~wangr06/touch%20review%20organization/VanLFR02.pdf>.

16. **Hao J.** Kinematic and Static Analysis of a Cable-driven 3-DOF Delta Parallel Mechanism for Haptic Manipulators. *Proceedings of the 34th Chinese Control Conference*, 2015, Hangzhou, China.

17. **Giuk L.** A Novel Haptic Device with High-force Display Capability and Wide Workspace. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, 2016.

18. **Junpei A.** Haptic Device Using a Newly Developed Redundant Parallel Mechanism. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, Vol. 27, No. 2.

19. **Sung-Uk L.** Analysis and Optimal Design of a New 6-DOF Parallel Type Haptic Device. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, Beijing, China.

20. **Jung W.Y.** Optimum design of 6-DOF parallel manipulator with translational/rotational workspaces for haptic device application. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Springer, 2010.

21. **Minh H.V.** A New 6-DOF Haptic Device for Tele-operation of 6-DOF Serial Robots. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, Vol. 60, No. 11.

22. **Vu M.H.** Tele-operation of a 6-DOF Serial Robot Using a New 6-DOF Haptic Interface. *IEEE International Symposium Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE)*, 2010.

23. **Lambert P.** A Novel Parallel Haptic Device with 7 Degrees of Freedom. *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Northwestern University, Evanston, IL, USA, 2015.

24. **Dongseok R.** Development of a six DOF haptic master for teleoperation of a mobile manipulator. *Mechatronics*, Elsevier, 2009.
25. **Huanhuan Q.** Design and Calibration of a New 6-DOF Haptic Device. *Sensors*, 2015, No. 11.
26. **Novint.** Available: <http://www.novint.com/index.php/novintfalcon> (Accessed: 02.10.2016).
27. **Force Dimension.** Available: <http://www.forcedimension.com/company/about> (Accessed: 03.10.2016).
28. **Products of Force Dimension.** Available: <http://www.forcedimension.com/products> (Accessed: 03.10.2016).
29. **Quanser.** Available: <http://www.quanser.com/> (Accessed: 03.10.2016).
30. **5-DOF Haptic Wand.** Available: http://www.quanser.com/Products/Docs/74/5DOF_Haptic_Wand.pdf (Accessed: 03.10.2016).
31. **Kazuo H.** Development of Bilateral Wearable Device “Kento” for Control Robots using Muscle Actuator Modules. *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Toyama, Japan, 2009.
32. **Ikuo M.** An Advanced Musculoskeletal Humanoid Kojiro. *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robotics*, 2007.
33. **Yosuke M.** Operation Assist for a Teleoperated Robot System Controlled with a Lightweight and High-Operable Master Device. *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. Meijo University, Nagoya, Japan, 2015.
34. **Brygo A.** Synergy-Based Interface for Bilateral Tele-manipulations of a Master-Slave System with Large Asymmetries. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Stockholm, Sweden, 2016.
35. **CyberGlove Systems.** Available: <http://www.cyberglovesystems.com> (Accessed: 08.10.2016).
36. **Martinez-Terran G.** CyberForce Haptic Device: Kinematics and Manipulability. *Proceedings of International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*, 2015.
37. **Chaobin L.** iFeel3: a Haptic Device for Virtual Reality Dental Surgery Simulation. *Proceedings of the International Conference on Virtual Reality and Visualization*, 2011.
38. **Hongmin W.** Design of a Novel Serial and Parallel Force Feedback Master Manipulator. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Tianjin, China, 2010.
39. **Masaru U.** *Design of a Compact 6-DOF Haptic Device to Use Parallel Mechanisms*. Available: <http://robots.stanford.edu/isrr-papers/final/final-15.pdf> (Accessed: 02.10.2016).

Received 01.11.2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ХАРУЗИН Сергей Вадимович
KHARUZIN Sergey V.
 E-mail: skharuzin@yandex.ru

ШМАКОВ Олег Александрович
SHMAKOV Oleg A.
 E-mail: shmakov@rtc.ru

DOI: 10.18721/JCSTCS.10202

УДК 621.865.8

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С АКТИВНО ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ РАМОЙ

С.В. Харузин¹, А.А. Иванов², О.А. Шмаков²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

²Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предложена структура системы управления автономным движением шестиколёсной повозки с активно трансформируемой рамой по поверхности с недетерминированным рельефом. Разработаны алгоритмы управления движением при преодолении произвольной последовательности препятствий типа эскарп, ров и спуск. Структура и алгоритмы управления реализованы в комплексной компьютерной модели системы управления и динамики повозки. Результаты моделирования подтверждают работоспособность и эффективность предложенных структурных и алгоритмических решений.

Ключевые слова: мобильный робот; вездеход; ситуационное управление; автономное движение; повозка с трансформируемой рамой.

Ссылка при цитировании: Харузин С.В., Иванов А.А., Шмаков О.А. Система управления автономным движением транспортного средства с активно трансформируемой рамой // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 22–31. DOI: 10.18721/JCSTCS.10202

AUTONOMOUS CONTROL SYSTEM FOR A VEHICLE WITH AN ACTIVELY TRANSFORMABLE FRAME

S.V. Kharuzin¹, A.A. Ivanov², O.A. Shmakov²

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

²State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), St. Petersburg, Russian Federation

In this paper we suggest a structure of autonomous control system for a six-wheeled vehicle with an actively transformable frame. A control system of the suggested structure allows the vehicle to move effectively on uneven terrain. Furthermore, we describe algorithms for control of vehicle configuration while it overcomes a random sequence of obstacles belonging to three classes: step, canal and descent from step. These algorithms utilize information about the instant configuration of the vehicle provided by proprioceptive sensors and the predicted height of the obstacle and range from it provided by exteroceptive sensors. Therefore, the algorithms switch vehicle movement modes depend on the instant situation in which it is involved. Stages of vehicle frame transformation are described for each mode. Hereafter the patterns of each feasible switching between modes and the dependency between the desired frame configuration and obstacle height are discussed. The suggested structure and algorithms are then realized and tested in a complex virtual model of control system and vehicle dynamics. Results of virtual modelling ensured the efficiency of the

suggested structural and algorithmical decisions.

Keywords: mobile robot; all-terrain vehicle; situational control; autonomous movement; vehicle with transformable frame.

Citation: Kharuzin S.V., Ivanov A.A., Shmakov O.A. Autonomous control system for a vehicle with an actively transformable frame. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 2, Pp. 22–31. DOI: 10.18721/JCSTCS.10202

Введение

Для обеспечения перемещения роботизированных колесных и гусеничных транспортных средств по поверхностям с препятствиями, вертикальные габариты которых сопоставимы с размерами движителей, применяются конструктивные решения, реализующие активную трансформацию подвески (колесно-шагающие машины) и/или рамы мобильной платформы. При управлении трансформируемой платформой оператором, наблюдающим одновременно препятствие и робота, адаптивная трансформация подвески/рамы представляется нетривиальной, но выполнимой задачей. В условиях практически интересного применения роботов визуальная информация ограничена изображением, поступающим с бортовых камер. Показания экстерорецептивных и проприорецептивных датчиков системы управления робота могут частично дополнить недостающую информацию. Однако из-за недостаточности информации или ее многоканальности телеоператорное управление многостепенным устройством оказывается практически нереализуемым. Поэтому для обеспечения эффективного движения устройства в среде с произвольными пространственными препятствиями необходимо решение задачи автоматизации, либо обеспечения полной автономности управления трансформацией платформы.

Подходы к решению задачи управления колесными и гусеничными устройствами с трансформируемыми подвесками/рамами достаточно широко представлены в литературе. В [1–3] рассмотрена задача управления морфологией гусеничных платформ с активными рычагами-гусеницами по неполным данным об окружении. В работе [4] изучен подход к построению системы автономного определения и преодоления препятствия типа лестница гусеничной

платформой с использованием элементов нечеткой логики. В статье [5] описаны этапы разработки колесно-гусеничного робота с изменяемым профилем гусеницы и рассмотрены алгоритмы преодоления эскарпов таким устройством. В работах [6–10] рассмотрены подходы к ситуационному планированию стратегии поведения шестиколесной платформы при движении в среде с препятствиями. В качестве информации, на основе которой происходят все необходимые расчеты, предложенные подходы используют показания датчиков конфигурации активной подвески и информацию о наличии контакта мотор-колес и подстилающей поверхности.

Нечеткий алгоритм предварительной классификации препятствия по ключевому параметру и пошаговый алгоритм преодоления типовых препятствий шестиколесной платформой рассмотрен в [11]. Авторами [12] предложена структура адаптивной к неровностям опорной поверхности полуавтоматической локомотивной моды для колесно-шагающего устройства с четырьмя ногами.

Предложенный в [13] подход использует элементы теории обучения с подкреплением для того, чтобы минимизировать расхождение фактических и желаемых состояний шестиколесного робота с активной подвеской при преодолении препятствия типа уступ. Вопросы предотвращения проскальзывания при движении по неровной поверхности с низким коэффициентом трения между колесами и опорной поверхностью изучены в [14]. В [15] рассмотрены алгоритмы предотвращения опрокидывания платформы при движении по неровной опорной поверхности.

Наша задача – разработка структуры и алгоритмов системы управления автономным движением робота на колесной платформе с трансформируемой рамой в среде с пространственными препятствиями.

В настоящей статье предложены структура и алгоритмы системы адаптивно-ситуационного управления шестиколесной платформой с трансформируемой рамой при преодолении произвольной последовательности препятствий типа эскарп, ров и обрыв с априорно неизвестными размерами. Структура и алгоритмы управления реализованы в комплексной компьютерной модели системы управления и динамики платформы. Для обоснования работоспособности и эффективности предложенных структурных и алгоритмических решений выполнены расчеты динамики автономного управляемого движения модели платформы.

Структура системы управления шестиколесной трансформируемой платформы

Изображение 3D CAD-модели трансформируемой колесной платформы с девятью приводами приведено на рис. 1 *а*. Платформа состоит из трех двухколесных модулей (поз. 1–3). Оси вращения моторколес (поз. 4–9) имеют фиксированное положение на модулях. Трансформация рамы происходит с помощью приводов поступательного перемещения переднего и заднего модулей (поз. 1, 2) относительно среднего модуля (поз. 3). Расстояние от мостов модулей до моста среднего модуля может увеличиваться на 33 % от номинального расстояния.

Привод шарнира вращения на среднем модуле обеспечивает поворот переднего модуля вокруг оси своего моста в диапазоне $\pm 90^\circ$.

Обеспечивающая движение с преодолением препятствий система управления робота содержит блоки в соответствии со схемой на рис. 2. На основе обновляемой с заданной частотой информации, поступающей с экстерорецептивных и проприорецептивных датчиков, правил классификации препятствий и целевых функций, блок генерации заданий формирует временные зависимости, задающие движение приводов в интервале обновления. Регулятор играет стандартную роль, формируя управляющие сигналы по рассогласованию задаваемого и наблюдаемого состояния. Минимальное число проприорецептивных датчиков соответствует числу приводов робота. Количество датчиков внешней среды (экстерорецептивных) должно быть достаточным для классификации препятствий и ориентации робота.

Препятствия могут быть разделены на три класса: 1) допускающие движение с пассивно адаптирующейся подвеской; 2) требующие для преодоления активную трансформацию рамы; 3) препятствия, непреодолимые при любых допустимых конфигурациях рамы платформы. Для препятствий первого и второго класса реализуются правила поведения при преодолении типовых препятствий. В третьем классе реали-

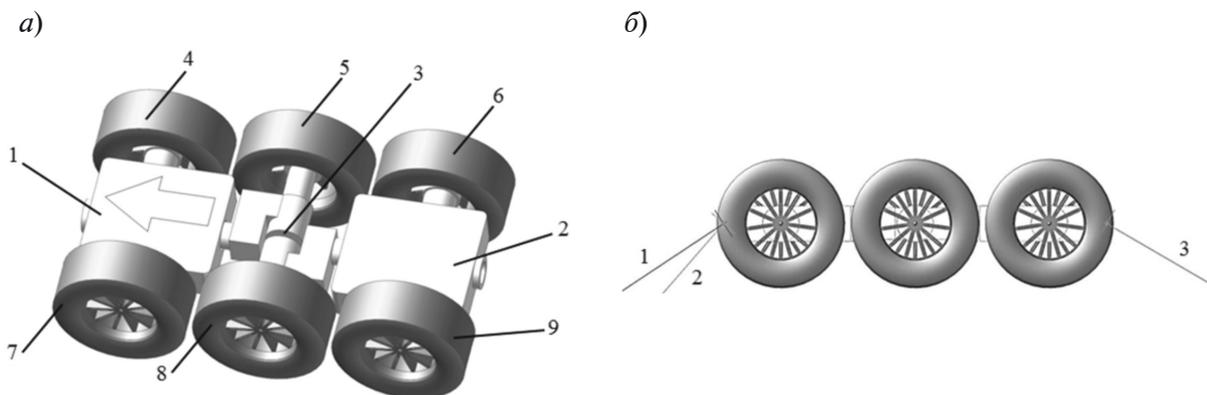


Рис. 1. 3D CAD-модель трансформируемой колесной платформы (*а*) и схема расположения дальномеров (*б*)

Fig. 1. 3D CAD-model of transformable six-wheeled vehicle (*a*) and optical range sensor beams (*b*)

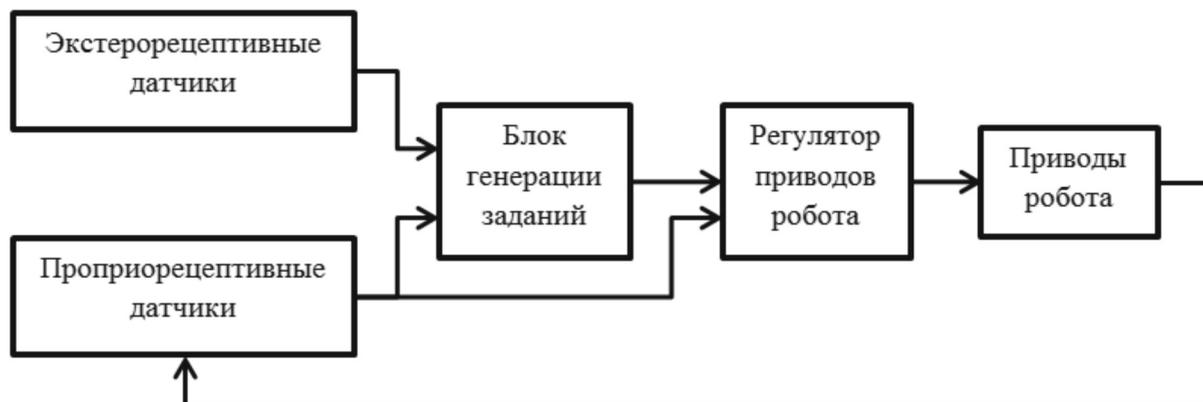


Рис. 2. Структурная схема системы управления движением трансформируемой платформы

Fig. 2. Generalized structure of control system

зуются алгоритмы остановки и возврата в номинальное (движение с пассивно трансформируемой подвеской) состояние.

Выявление препятствий и определение их типа происходит по показаниям трех зафиксированных на модулях дальномеров и двух двухосевых инклинометров на переднем и заднем модулях. Направления измерения дальномеров (поз. 1) и (поз. 2, 3) на рис. 1 б образуют с горизонтальными плоскостями модулей углы 30° и 45° соответственно.

Стратегии преодоления типовых препятствий

В настоящем разделе рассмотрены стратегии поведения платформы в пяти типовых сценариях: подъем на эскарп, спуск с эскарпа, преодоление рва, простое дви-

жение вперед, экстренная остановка при выявлении непреодолимого препятствия. Каждому типовому сценарию соответствует свой режим движения. Схема возможных переходов между режимами движения приведена на рис. 3. Из номинального режима, которому соответствует сценарий простого движения вперед, возможен переход в режим преодоления эскарпа, режим спуска с эскарпа, режим преодоления рва и режим экстренной остановки. Первые три режима преодоления типовых препятствий характеризуются этапами последовательно выполняемых трансформаций рамы платформы. По завершении последнего этапа трансформации происходит выход в номинальный режим.

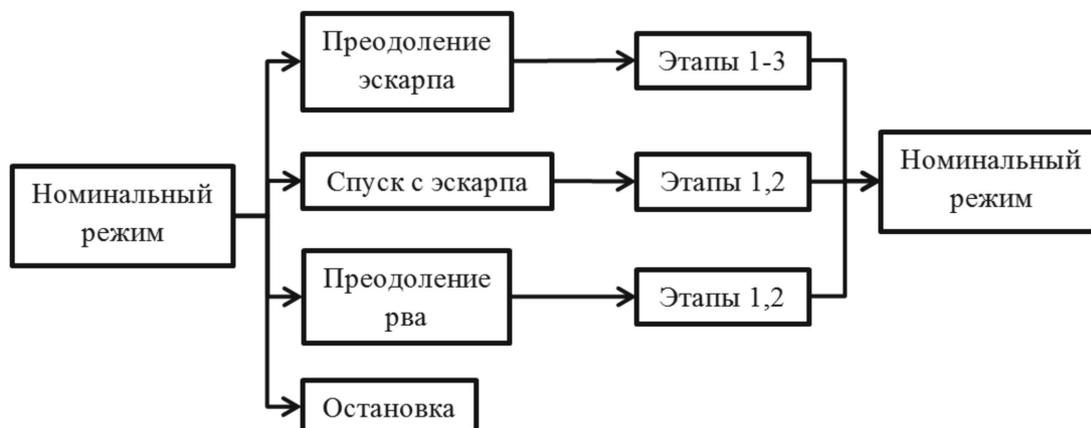


Рис. 3. Схема возможных переходов между режимами движения

Fig. 3. Diagram of executable switches between movement modes

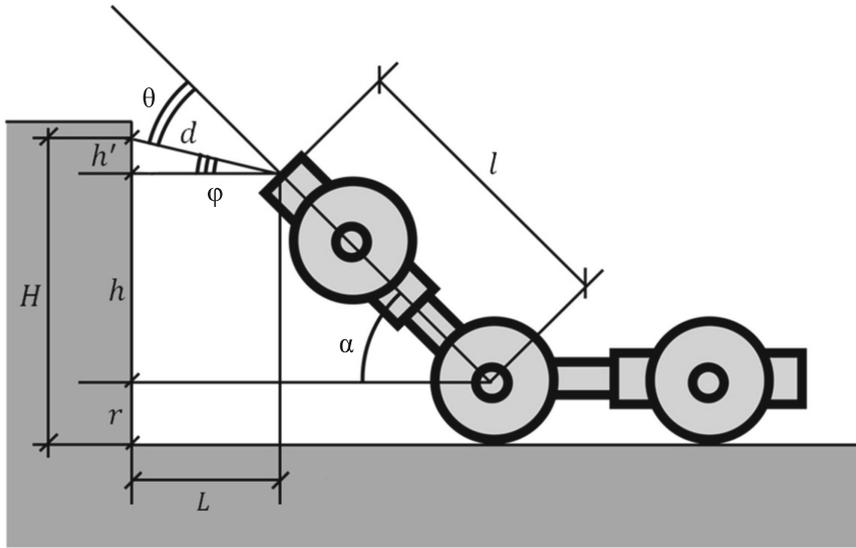


Рис. 4. Схема расчета измеряемой высоты препятствия и измеряемого расстояния до него
Fig. 4. Diagram for calculation of estimated parameters. Range sensor is placed on front module

Выявление наличия препятствия и его типа происходит по значениям прогнозируемой высоты препятствия и прогнозируемого расстояния до него. Под прогнозируемой высотой препятствия понимается длина вертикальной проекции отрезка, соединяющего точку падения луча дальномера и точку опоры средних или же передних (для дальномеров, установленных в переднем модуле) колес. Для расчета параметров, связанных с задним дальномером, принимается, что либо средние, либо задние колеса контактируют с опорной поверхностью. Под прогнозируемым расстоянием понимается горизонтальная проекция отрезка, соединяющего точку падения и точку испускания луча дальномера. Ниже приведен расчет указанных величин на примере дальномера переднего модуля. Схема расчета приведена на рис. 4.

Расчет прогнозируемых высоты H и расстояния L происходит в соответствии с выражениями:

$$H = r + l \cdot \sin(\alpha) + d \cdot \sin(\alpha - \theta), \quad (1)$$

$$L = d \cdot \cos(\alpha - \theta), \quad (2)$$

где r – радиус колеса; l – расстояние от оси средних колес до точки испускания луча дальномера; d – отрезок, соединяющий

точку испускания луча дальномера и точку его падения; α – угол наклона переднего модуля относительно заднего; θ – угол, характеризующий направление луча дальномера.

Определение наличия препятствия в непосредственной близости от платформы происходит по показаниям первого и второго дальномеров. В случае если прогнозируемая высота датчика 2 соответствует углублению, глубина которого превышает радиус колеса, а прогнозируемая длина датчика 1 показывает, что расстояние до стенки рва (наличие стенки определяется по рассогласованию прогнозируемых высот датчиков 1 и 2) меньше либо равно расстоянию между колесами платформы с максимально выдвинутыми модулями, то активируется режим преодоления рва. Если ширина рва превышает расстояние между колесами платформы, активируется режим спуска с эскарпа. Препятствие типа эскарп соответствует прогнозируемой высоте датчика 2, превышающей четверть радиуса колеса. Активация режима при относительно малой высоте эскарпа необходима, чтобы обеспечить его преодоление при малом коэффициенте трения между опорной поверхностью и колесами. Если прогнозируемая высота препятствия превышает установ-

ленные пределы, то активируется режим экстренной остановки.

В качестве предельных выбраны значения прогнозируемой глубины или высоты, составляющие ± 560 мм. Эта величина соответствует максимальной высоте эскарпа, на которую возможен подъем колеса переднего модуля с учетом толщины модуля. Если прогнозируемая высота лежит в диапазоне от $-r/2$ до $r/4$, то активен номинальный режим движения.

Движение платформы в среде с произвольным расположением типовых препятствий можно разделить на этапы, соответствующие режимам движения платформы. На рис. 5 приведены схемы конфигурации платформы на различных этапах режимов движения по полосе препятствий. При движении по рельефу, определяемому датчиками 1–3 как «плавно меняющийся», плат-

форма движется в номинальном режиме (поз. 1). В этом режиме движения модули втянуты, а активные шарниры поворотной трансформации, передние и средние колеса – пассивны. Управляющие воздействия подаются только на задние колеса.

Выявление уступа выводит платформу из номинального режима в первый этап преодоления эскарпа. Конечная конфигурация платформы на этом этапе соответствует поз. 2. Достижение положения поз. 2 определяется по резкому изменению показаний датчиков. Положение поз. 3 достигается выпрямлением рамы и коррекцией угловой скорости заднего привода (увеличением на величину угловой скорости в шарнире трансформации). Переход в положение поз. 4 производится трансформацией рамы до вступления средних колес в контакт с опорной поверхностью,

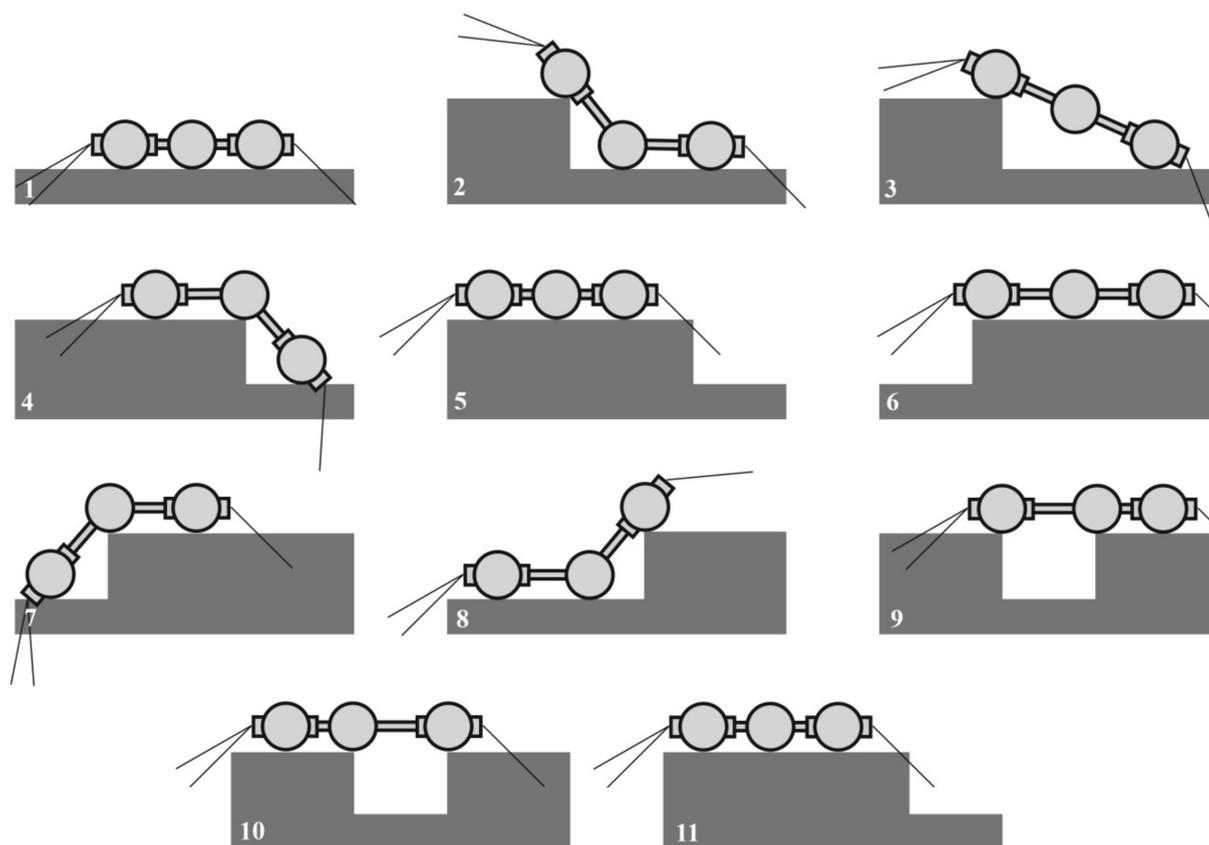


Рис. 5. Схемы конфигурации платформы на различных этапах режимов движения по полосе препятствий

Fig. 5. Simplified images of different platform configurations at different stages of movement

определяемый по показаниям дальномеров 1,2. Затем происходит подтягивание заднего модуля и переход в номинальный режим (поз. 5). Положение, при котором платформа находится в непосредственной близости от края спуска с эскарпа (поз. 6), соответствует первому этапу режима спуска. Передний и задний модули вытягиваются на длину, обеспечивающую безопасный спуск (т. е. длину, при которой возможен одновременный контакт средних колес и поверхности уступа и передних колес и опорной поверхности в непосредственной близости от уступа), вращающий момент подается только на задние колеса, привод изгибания платформы пассивен. При переходе от положения поз. 7 к поз. 8 активируются приводы передних и средних колес, коэффициент регулятора вращающего момента срединного шарнира уменьшается в 10 раз, что обеспечивает плавный спуск среднего моста.

При определении по дальномерам 1,2 препятствия типа ров происходит последовательный переход (поз. 9, 10, 11). На первом этапе преодоления рва передний модуль выдвигается так, чтобы расстояние между опорными точками переднего и среднего колес равнялось ширине рва. Как только дальномеры фиксируют опорную поверхность под колесами переднего модуля, происходит переход ко второму этапу преодоления рва: срединный модуль сдвигается в сторону переднего, продольный габарит платформы при этом не изменяется. Это действие необходимо для переноса веса к переднему модулю. Активными в этом случае являются приводы трансформации (режим удержания) и задних колес. При преодолении препятствий типа спуск и ров выход в номинальный режим движения (первое описанное состояние) происходит, когда третий дальномер фиксирует наличие под задними колесами опорной поверхности.

Структура алгоритма управления платформой

Алгоритм состоит из шести этапов, последовательно выполняемых на каждом шаге моделирования. На первом этапе происходит опрос экстерорецептивных

и проприорецептивных датчиков, расчет измеряемых величин высоты препятствия и расстояния до него. На основе полученной информации происходит выбор режима движения платформы. Затем, в зависимости от состояния платформы и текущего этапа преодоления препятствия, формируется задание на реконфигурацию платформы. Далее полученное задание корректируется в соответствии с текущими заданиями на скорости вращения колес и выдвижения звеньев. Этот шаг необходим ввиду того, что при выдвижении или втягивании модулей расстояние между колесами уменьшается или увеличивается. Если колеса при этом вращаются, это может привести к их пробуксовке как одному из следствий потери сцепления с опорной поверхностью. Поэтому значения желаемых скоростей вращения колес корректируются по отношению к скоростям выдвижения модулей. Корректировка происходит так, чтобы при выдвижении заднего модуля выполнялся режим качения задних колес. Аналогично, при втягивании модуля скорость вращения колес увеличивается, что предотвращает «отставание» колес от модуля. В случае выдвижения/втягивания переднего модуля затормаживаются/ускоряются задние и средние колеса. В общем виде корректирующее выражение для расчета угловой скорости вращения колеса имеет вид:

$$\omega = \omega_0 \pm \left(\frac{v}{r_w} \right), \quad (3)$$

где ω — конечная угловая скорость колеса; v — скорость выдвижения/втягивания переднего/заднего модулей; r_w — радиус колеса платформы.

Последними этапами работы алгоритма являются расчет рассогласований между текущими заданиями и фактическими величинами скоростей вращения колес, угла сгиба платформы и длин, на которые должны быть выдвинуты модули, и передача полученных значений ошибок на ПИД-регуляторы. Сформированные вращающие моменты и усилия затем прикладываются к исполнительным системам платформы.

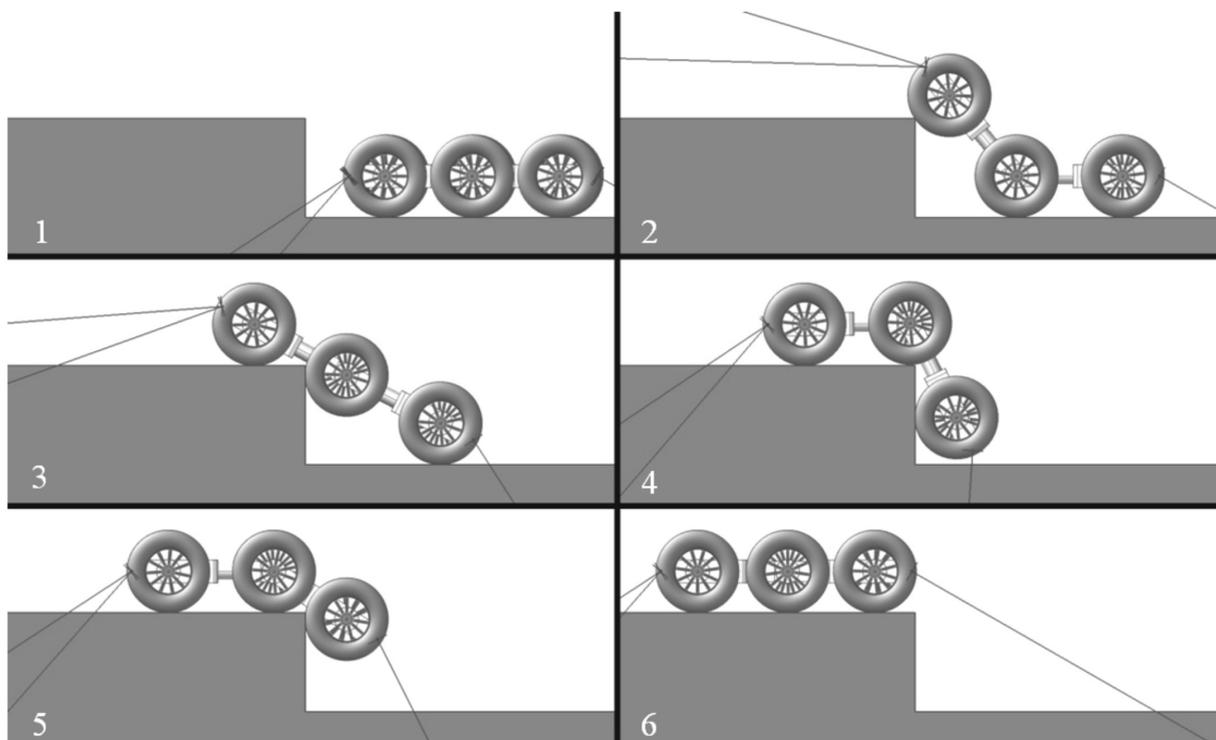


Рис. 6. Кинограмма анимации результатов моделирования динамики платформы при преодолении эскарпа

Fig. 6. Obstacle negotiation process

Виртуальный эксперимент

Разработанный подход к построению системы управления автономным движением в среде с препятствиями апробирован на комплексной компьютерной модели системы управления и динамики трансформируемой платформы.

Во время виртуального моделирования происходило итерационное выполнение последовательности шагов рассмотренного алгоритма с частотой 100 Гц. Сформированные виртуальной моделью системы управления вращающие моменты и усилия прикладывались к элементам механической системы повозки – колесам и модулям. Тестирование проводилось при различных параметрах контактирующих поверхностей. В частности, величина коэффициента трения во время экспериментов выбиралась из диапазона от 0,3 до 0,7.

Работа алгоритма рассмотрена на примере результатов моделирования динамики платформы при преодолении эскарпа

с величиной коэффициента трения между опорными поверхностями и колесами тележки 0,3. Кинограмма анимации результатов моделирования приведена на рис. 6.

При подъезде к эскарпу платформа движется в первом режиме (поз. 1). Затем платформа начинает подъем передних колес на опорную поверхность уступа (поз. 2). По достижении рассчитанного из геометрических соображений угла поворота срединного шарнира начинается поворот в обратную сторону (поз. 3, 4). Затем начинается третий этап преодоления эскарпа – задний модуль втягивается и поднимается на опорную поверхность уступа (поз. 5, 6). По завершении этапа платформа переходит в номинальный режим.

Заключение

Апробирование разработанного алгоритма на виртуальной динамической модели показало его эффективность при преодолении платформой уступов различной

высоты, спуске с относительно высоких уступов и при пересечении рвов. Включенные алгоритмы в систему управления движением платформы обеспечивают преодо-

ление препятствий с малым динамическим коэффициентом трения между опорными поверхностями и колесами устройства (от 0,3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Anastasios I. M.** Autonomous Stair Climbing for Tracked Vehicles // *The International Journal of Robotics Research*. 2007.

2. **Martin P.** Controlling Robot Morphology from Incomplete Measurements // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. IEEE, 2016.

3. **Michael B.** Hierarchical Rough Terrain Motion Planning using an Optimal Sampling-Based Method // *Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation (ICRA-2013)*. Karlsruhe, Germany, 2013.

4. **Mihankhah E.** Autonomous Staircase Detection and Stair Climbing for a Tracked Mobile Robot Using Fuzzy Controller // *Proc. of 2008 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Biomimetics*. Bangkok, Thailand, 2009.

5. **Wenzeng G.** Development of a Transformable Wheel-track Mobile Robot and Obstacle-Crossing Mode Selection // *Proc. of 2014 IEEE Internat. Conf. on Mechatronics and Automation*. Tianjin, China, 2014.

6. **Kyeong B.L.** Behavior planning of an unmanned ground vehicle with actively articulated suspension to negotiate geometric obstacles // *Proc. of 2009 IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. St. Louis, USA, 2009.

7. **Bin X.** Composite Control Based on Optimal Torque Control and Adaptive Kriging Control for the CRAB Rover // *Proc. of 2011 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation*. Shanghai, China, 2011.

8. **Jingli L.** Study on the Mobile Robot Reconfiguration Control Methods // *Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Automation and Logistics*.

Shenyang, China, 2009.

9. **Weidong W.** The Optimization of Obstacle-Crossing and the Simulation in ADAMS of the Composite Sixwheeled-legged Robo // *Proc. of 9th Internat. Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2012)*. IEEE, 2012.

10. **Min X.** Kinematics Modeling and Step Climbing Study of an All-Terrain Wheeled Mobile Robot on Uneven Terrains // *Proc. of 2011 Internat. Conf. on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. IEEE, 2011.

11. **Kyeong B.L.** Obstacle-Overcoming Algorithm for Unmanned Ground Vehicle with Actively Articulated Suspensions on Unstructured Terrain // *Proc. of Internat. Conf. on Control Automation and Systems*. Seoul, Korea, 2008.

12. **Shuro N.** Concept of Adaptive Gait for Leg-wheel Robot, RT-Mover // *Proc. of 2012 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Biomimetics*. Guangzhou, China, 2012.

13. **Kyeong B.L.** Deliberative Planner for UGV with Actively Articulated Suspension to Negotiate Geometric Obstacles by Using Centipede Locomotion Pattern // *Proc. of Internat. Conf. on Control, Automation and Systems*. KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, 2010.

14. **Pierre L.** Wheel torque control for a rough terrain rover // *Proc. of 2004 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation*. New Orleans, LA, 2004.

15. **Leah K.** Tip-over Prevention: Adaptive Control Development and Experimentation // *Proc. of 2015 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. Washington State Convention Center Seattle, Washington, 2015.

Статья поступила в редакцию 09.11.2016

REFERENCES

1. **Anastasios I.M.** Autonomous Stair Climbing for Tracked Vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 2007.

2. **Martin P.** Controlling Robot Morphology from Incomplete Measurements. *Proceedings of the IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, 2016.

3. **Michael B.** Hierarchical Rough Terrain Motion Planning using an Optimal Sampling-Based Method. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, 2013.

4. **Mihankhah E.** Autonomous Staircase Detection and Stair Climbing for a Tracked Mobile Robot using Fuzzy Controller. *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, Thailand, 2009.

5. **Wenzeng G.** Development of a Transformable Wheel-track Mobile Robot and Obstacle-crossing Mode Selection. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Tianjin, China, 2014.

6. **Kyeong B.L.** Behavior planning of an unmanned ground vehicle with actively articulated suspension

to negotiate geometric obstacles. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, USA, 2009.

7. **Bin X.** Composite Control Based on Optimal Torque Control and Adaptive Kriging Control for the CRAB Rover. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai International Conference Center, China, 2011.

8. **Jingli L.** Study on the Mobile Robot Reconfiguration Control Methods. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Shenyang, China, 2009.

9. **Weidong W.** The Optimization of Obstacle-Crossing and the Simulation in ADAMS of the Composite Sixwheeled-legged Robo. *Proceedings of the 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2012)*, IEEE, 2012.

10. **Min X.** Kinematics Modeling and Step Climbing Study of an All-Terrain Wheeled Mobile Robot on Uneven Terrains. *Proceedings of the International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, IEEE, 2011.

11. **Kyeong B.L.** Obstacle-Overcoming Algorithm for Unmanned Ground Vehicle with Actively Articulated Suspensions on Unstructured Terrain. *Proceedings of the International Conference on Control Automation and Systems*, Seoul, Korea, 2008.

12. **Shuro N.** Concept of Adaptive Gait for Leg-wheel Robot, RT-Mover. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Guangzhou, China, 2012.

13. **Kyeong B.L.** Deliberative Planner for UGV with Actively Articulated Suspension to Negotiate Geometric Obstacles by Using Centipede Locomotion Pattern. *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems*, KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, 2010.

14. **Pierre L.** Wheel torque control for a rough terrain rover. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, 2004.

15. **Leah K.** Tip-over Prevention: Adaptive Control Development and Experimentation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Washington State Convention Center Seattle, Washington, 2015.

Received 09.11.2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ХАРУЗИН Сергей Вадимович

KHARUZIN Sergey V.

E-mail: skharuzin@yandex.ru

ИВАНОВ Александр Александрович

IVANOV Aleksander A.

E-mail: al_ivanov@rtc.ru

ШМАКОВ Олег Александрович

SHMAKOV Oleg A.

E-mail: shmakov@rtc.ru

DOI: 10.18721/JCSTCS.10203

УДК 519.876.5, 004.023:896

АЛГОРИТМ РАЗРЕШЕНИЯ КОЛЛИЗИЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ПРОСТРАНСТВЕННО-СИТУАЦИОННОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

Д.Е. Моторин, С.Г. Попов, Л.М. Курочкин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен алгоритм разрешения коллизий при планировании действий группы роботов в условиях изменяющейся среды. Во время движения группы к цели возникают пересечения траекторий, приводящие к коллизиям – столкновениям. Проведено сравнение трех подходов к разрешению коллизий: игнорирование коллизий, разрешение всех коллизий последовательно для пар роботов и разрешение коллизий последовательным расширением группы роботов. Эффективность алгоритма оценена исходя из полноты решения задачи и скорости разрешения коллизий, при условии минимизации проходимого каждым роботом пути. Разрешение коллизий произведено удлинением траектории робота в область свободного пространства вокруг места коллизии. Алгоритм состоит из трех частей: поиск свободных от препятствий областей вокруг коллизии для каждого робота, исключение из полученной области областей возможных коллизий и минимизация удлинения пути в полученной области. Исследование алгоритма выполнено средствами имитационного моделирования, в котором реализована модель среды и группы роботов, движущихся в ней. Определены границы применимости и даны рекомендации по выбору режимов работы алгоритма разрешения коллизий при планировании движения. Предложенный алгоритм разрешения коллизий может использоваться при планировании движения групп роботов в условиях пространственно-ситуационной неопределённости.

Ключевые слова: управление; группа роботов; коллизия; динамическая карта; планирование движения; пространственно-ситуационная неопределённость.

Ссылка при цитировании: Моторин Д.Е., Попов С.Г., Курочкин Л.М. Алгоритм разрешения коллизий при планировании движения группы роботов в условиях пространственно-ситуационной неопределённости // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 32–44. DOI: 10.18721/JCSTCS.10203

AN ALGORITHM FOR COLLISION AVOIDANCE IN PATH PLANNING FOR A GROUP OF ROBOTS IN A SPATIO-SITUATIONAL INDETERMINACY

D.Ye. Motorin, S.G. Popov, L.M. Kurochkin

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

The paper considers a collision avoidance path-planning algorithm for a group of robots in a spatio-situational indeterminacy. When moving a group of robots to the target paths, crossing is the cause of collision. The authors compared three approaches

to collision avoidance: ignoring collisions, resolution of all collisions for pairs of robots, resolution of collisions by expanding the group of robots. The effectiveness of the algorithm is evaluated based on the completeness of the solution of the problem and the collision resolution rate while minimizing each robot path. Collision avoidance is achieved by extension of the trajectory of the robots in the free space around the collision area. The algorithm consists of three parts: searching for the space free of obstacles around the collision area for each robot, exclusion from the resulting field areas of possible conflicts and minimizing the elongation paths in the obtained field. The algorithm was studied by simulation modeling, which implemented a model of the environment and the group of robots. The result of this work was to determine the limits of applicability and recommendations for the choice of the operating modes of the collision avoidance path-planning algorithm. The proposed algorithm can be used in case of path planning for a group of robots in a spatio-situational indeterminacy.

Keywords: control; group of robots; collision; dynamic environment; path planning; spatio-situational indeterminacy.

Citation: Motorin D.Ye., Popov S.G., Kurochkin L.M. An algorithm for collision avoidance in path planning for a group of robots in a spatio-situational indeterminacy. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 2, Pp. 32–44. DOI: 10.18721/JCSTCS.10203

Введение

Управление движением группы интеллектуальных роботов сопряжено с рядом сложностей, начиная с задачи целеполагания и заканчивая выработкой законов подачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы. Алгоритмы планирования движения разрабатываются с учётом локальных, находящихся в непосредственной видимости, и глобальных, централизованно передаваемых в группе роботов, данных о динамической среде движения. При условии применения алгоритмов с учётом только локальных данных пространственно-ситуационная неопределённость разрешается в текущий момент времени и местоположения, а область обнаружения коллизии ограничена радиусом видимости роботов.

Использование глобальных данных обеспечивает решение задачи «в целом», на всех временных дистанциях и в любых пространственных областях. Например, в [1] используется децентрализованный подход, основанный на декомпозиции задачи глобального планирования с последующей локальной корректировкой пути. Решение задачи планирования траекторий с максимальным покрытием области движения, представленное в [2], учитывает ошибки скорости и направления движения робота. Метод локального избегания препятствий в

[3] основан на использовании ультразвуковых датчиков. В смежных научных областях проблема обнаружения и разрешения коллизий активно исследуется при твердотельном моделировании и визуализации [4], где методом аппроксимирующих контейнеров производится определение наличия коллизий трёхмерных объектов, или [5] рассматривается для обнаружения пространственных коллизий в реальном времени.

При достижении комплексных целей требуется их разбиение на несколько задач и подзадач и последующее распределение последних по роботам в группе. В подобных случаях необходимо планирование действий с учетом состава группы и параметров каждой функциональной единицы. Построение индивидуальных маршрутов и действий может вызывать коллизии во время движения, разрешение которых в процессе планирования, а не во время их возникновения, позволяет повысить вероятность достижения цели.

При поиске столкновений используются два подхода: априорный и апостериорный. Априорный подход применяется для поиска уже произошедших столкновений. Априорный подход к коллизиям используется, например, в [6, 7], где робот-манипулятор, анализируя крутящий момент приводов, обнаруживает коллизию при непосредственном физическом контакте. Манипу-

лятор для разрешения проблемы применяет избыточные степени свободы и звенья конструкции.

Апостериорный подход использует траекторию движения объектов и способен «предсказывать» столкновения. В области планирования действий группы роботов апостериорный подход требует больших вычислительных мощностей, но дает возможность решать сложные задачи координации движения в ограниченном пространстве.

Существуют алгоритмы, позволяющие реагировать на возможные столкновения в реальном времени. В [8] описан способ, помогающий избегать столкновений группой роботов посредством ограничения минимального расстояния между координатами каждого робота. Такое решение эффективно при управлении большими группами объектов. У каждого робота имеются минимальные вычислительные мощности на борту и нет возможности решать множество сложных задач, а объем расчетов при централизованном управлении нецелесообразен. В таких случаях главное — оптимальность движения всей группы как единого объекта без учета каждого робота в отдельности. Основным недостаток этого метода заключается в том, что он не позволяет разрешать сложные коллизии в ограниченном пространстве, т. к. реагирует на мгновенные действия без учета глобального движения группы.

Восприятие роботом окружающей среды происходит через датчики, поэтому важным вопросом является определение объектов окружающей среды как препятствий и их объезд. Основным результат в [9] — объединение для анализа нескольких датчиков и встраивание их в алгоритм разрешения коллизий на основе локальных данных.

Наиболее полно апостериорный подход для разрешения коллизий применен в [10]. Для построения путей использован многоуровневый супер-граф, редуцируемый посредством объединения нескольких узлов в один. При разрешении коллизий такой подход предполагает полный перебор всего графа. Этот подход использован в [11] для распределения областей передвижения

роботов в детерминированном общем пространстве.

В [12] рассмотрен распределенный алгоритм планирования движения группы роботов в среде динамических препятствий. При этом планирование движения происходит на основе динамических приоритетов роботов и минимизации длины пути каждого робота. Избегание коллизий осуществляется попарным разделением траекторий между роботами и движущимися препятствиями. В [13] разработан подход по формированию траекторий для группы роботов, поддерживающих заданную форму. Разрешение коллизий между роботами в этом случае происходит за счет их заданного взаиморасположения, а избегание коллизий с движущимися препятствиями — ограничением минимального расстояния между роботом и препятствием.

В статье [16] рассмотрена задача низкоуровневой стратегии управления группой роботов, движущихся в динамической среде. Каждый робот представлен системой нелинейных уравнений второго порядка. Для алгоритма разрешения коллизий использованы репульсионные функции.

Разрешение коллизий движения группы роботов с использованием введения начальных временных задержек представлено в [17]. Исследованный алгоритм с помощью методов линейного программирования вычисляет время задержек при движении и распределяет траектории между роботами в группе.

Для планирования траекторий движения группы роботов и разрешения коллизий на карте, размеченной регулярной сеткой, используется модифицированный алгоритм муравьиных колоний [18]. Избегание коллизий производится за счет определения временных окон пересечения траекторий каждого робота и разрешения коллизий посредством использования приоритетов.

В работе [19] группа роботов движется в пространстве с заданными индивидуальными контрольными точками. Корректировка траекторий движения роботов осуществляется за счет описания группы роботов системой дифференциальных уравнений и метода барьеров для избегания коллизий.

Навигация при взаимодействии группы роботов между собой и с человеком исследована в [20]. В статье изучено применение и комбинация методов управления с помощью потенциального поля, рыночной оптимизации и транспортных правил.

В [21] рассмотрен распределенный подход к разрешению коллизий и взаимного блокирования группы роботов. Алгоритм автономно моделирует каждый шаг робота на возможность происхождения коллизий и блокировок и корректирует движение при необходимости.

Перечисленные выше алгоритмы и методы имеют ограничения либо по сложности разрешаемых коллизий, либо по времени, требуемому для получения результата.

Настоящая работа является логическим продолжением работы [14], направленным на реализацию и исследование алгоритма разрешения коллизий при увеличенном числе роботов в группе. Исследуемый алгоритм является частью системы управления планирования движения группы роботов в динамической среде. Система обладает клиентской и серверной частью, идентичной для каждого робота. Система включает в себя формирование глобальной последовательности действий, распределение целей по роботам из [15], разрешение коллизий, синхронизацию информации и действий, поддержание связи.

Постановка задачи

Задача рассматривается на динамической карте, размеченной регулярной сеткой размером $(a \times b)$ ячеек. Будем считать, что каждая ячейка сетки может быть либо проходимой, либо нет. Обозначим карту через E , где E^p – свободная ячейка, E^w – ячейка с препятствием. Карта заполняется препятствиями на α %. В процессе движения роботов на карте изменяется положение ω % препятствий.

На карте размещено n роботов в начальных точках $B = \{B_1, \dots, B_k, \dots, B_n\}$. Роботы объединены в одну группу $R = \{R_1, \dots, R_k, \dots, R_n\}$. На карте размещены n целевых точек $Z = \{Z_1, \dots, Z_k, \dots, Z_n\}$, в которые должны приехать роботы; в каждую целевую точку должен прибыть один робот; любая точка

может быть занята любым роботом.

Состояния «робот-среда» в каждый момент описываются как $S(t) = \langle R_1(t), \dots, R_n(t), E(t) \rangle$. Каждый робот описан следующим набором параметров: r_c – радиус связи; r_v – радиус видимости; b_i – уровень заряда батареи; v – скорость. Связь между роботами имеется всегда, видима вся карта. Начальный заряд батареи обеспечивает запас хода по любой траектории карты $L = \{L_1, \dots, L_k, \dots, L_n\}$.

$$L(L_1, \dots, L_k, \dots, L_n) : \forall R_k \in R (\text{len}(L_k - L_k^*) \rightarrow \rightarrow \min) \mid \forall t \text{ cross}(L_i, L_j) = \emptyset \forall (i, j), i \neq j,$$

где $\text{len}(L_k - L_k^*)$ – длина отклонения от невозмущенной траектории, $\text{cross}(L_i, L_j)$ – пересечение траекторий,

$$L_k = \{B_{Rk}, l_1, \dots, l_j, \dots, l_g, Z_{Rk}\} \in L : l_j \in E^p.$$

Цель исследования – разработка и анализ эффективности применения алгоритма разрешения коллизий для группы роботов в условиях пространственно-ситуационной неопределённости.

Описание алгоритма разрешения коллизий

Алгоритм состоит из трех частей: поиск «в ширину» свободных от препятствий областей вокруг коллизии для каждого робота, исключение из полученной области областей возможных коллизий с другими роботами и минимизация удлинения пути в полученной области. Под коллизией понимается пересечение траекторий двух объектов в одной точке пространства в один момент времени. Реализованный алгоритм представлен на рис. 1.

I. Поиск «в ширину» свободных от препятствий областей вокруг коллизии для каждого робота. Для разрешения коллизии нам необходимо найти такие точки (x_s, y_s) в окружающей среде области коллизии, которые не будут заняты препятствием или другими роботами в просматриваемый момент времени.

Входными данными для этого блока является массив точек CP_{ij} . Обходим его, используя поиск в ширину, просматривая каждую точку, применяя следующие правила:

- 1) не является препятствием;



Рис. 1. Алгоритм разрешения коллизий

Fig. 1. Collision avoidance algorithm

2) не принадлежит CP .

Выбранные координаты точек записываем в LP . В качестве времени используем текущее значение плюс единица $CP(t)_i + 1$. Также при просмотре точек проверяем их принадлежность путям других роботов:

3) если в просматриваемый момент времени робот, не входящий в текущую группу, находится в этой точке, то присоединяем его к коллизии, а также оцениваем его вклад в область коллизии CP .

Полученные точки LP присоединяются к массиву CP .

II. *Исключение из полученной области областей возможных коллизий с другими роботами.* Входными данными является

массив точек LP , возможных для разрешения коллизии. На данном этапе анализируется не физическая возможность использования этих точек, а принципиальная возможность разрешения через нее коллизии.

Фильтруем точки по следующим правилам:

1) $LP(i)$ не принадлежит траекториям какого-либо из роботов Rn , участвующих в коллизии после момента вхождения этого робота в нее, другими словами, после момента времени $(t_c - d - 1)$;

2) точка является частью ветвления на карте, т. е. сопряжена с точкой, являющейся смежной как минимум с тремя точками;

3) если точка принадлежит траектории робота из Rn , то она маркируется как его решение.

По завершении фильтрации оставшиеся точки LP присоединяются к массиву точных решений RP . Решениями будем считать те точки, через которые необходимо проложить маршруты роботов для избегания коллизии.

III. *Минимизация удлинения пути в полуженной области.* Входными данными для последнего блока является список точек RP , причем количество точек должно быть не меньше, чем роботов, участвующих в коллизии. Разрешение коллизии производится в следующей последовательности:

1) роботы разделяются на две группы: $R^{(i)}$ – те, чьи точки решения принадлежат их путям, и $R^{(ii)}$ – остальные; также разделяются решения $RP^{(i)}$ (маркированные, см. п. II(3)) и $RP^{(ii)}$;

2) для $R^{(i)}$ копируются их существующие траектории, маркируется момент вступления в коллизию и из рассмотрения исключаются точки, принадлежащие им;

3) для $R^{(ii)}$ копируются их существующие траектории до момента их вступления в коллизию;

4) для всех $R^{(ii)}$ оцениваются расстояния до всех оставшихся точек $RP^{(ii)}$, которые распределяются таким образом, чтобы каждому роботу досталась ближайшая;

5) далее оцениваем длительность D нахождения робота в коллизии, используя исходные траектории $L(Rn)$;

6) на основе оценок длительности D определяем, какой из роботов начнет движение первым, проверяем, имеются ли роботы в группе Rn , с которыми он может ехать одновременно. Если имеются, то они едут одновременно. Далее каждому роботу в момент вступления в коллизию добавляется ожидание, равное длительности нахождения этого робота (или максимальное, если их несколько) в коллизии;

7) после формирования новых траекторий они проверяются на наличие коллизий на отрезке времени вхождения в коллизию до окончания ее разрешения на основе удлинений на шаге f . Если коллизии сохранились, то продолжаем поиск точек.

Если в ходе разрешения коллизии не было найдено решение, то траектории роботов, участвующих в решении изначально, останавливаются в момент перед непосредственной коллизией.

Указанные блоки выполняются в цикле один за другим до тех пор, пока либо не будут проверены все точки, либо не будет найдено решение. Разработанный подход позволяет избежать полного перебора точек, возможных для разрешения коллизий, и перебора времени задержек для каждого робота.

Описанный алгоритм при исследовании модифицирован для двух случаев: полный, в котором все действия выполняются в полном объеме, и парный, в котором не происходит расширения группы. Соответственно поля, занимаемые другими роботами, считаются запрещенными для разрешения коллизии.

Условия проведения и результаты экспериментов

Цель экспериментов – исследование эффективности функционирования алгоритма при разрешении пар конфликтов по мере их возникновения и расширении конфликтующей группы с последующим разрешением конфликта. Сравнение проводилось с контрольным случаем, в котором алгоритм разрешения коллизий не использовался. Исследование осуществлялось запуском среды моделирования с последовательным перебором:

числа роботов в группе;

плотности заполнения карты препятствиями;

частоты изменения расположения препятствий на карте.

Для каждой комбинации значений параметров было произведено десять циклов моделирования. Параметры тестирования среды моделирования указаны в таблице.

При моделировании контролировались следующие параметры:

число столкнувшихся роботов, причём при столкновении все участвовавшие в них роботы вышли из строя;

число роботов, выполнивших задание;

полное время моделирования;

число вызовов алгоритмов разре-

Параметры тестирования среды моделирования
Simulation parameters

Параметр или константа	Значение	Единицы измерения
Размер карты	50×50	ед. ²
Число роботов в группе	[2, 5, 10, 20]	ед.
Радиус видимости	80	ед.
Радиус связи	80	ед.
Заполнение карты препятствиями	0–60 (с шагом 10)	% карты
Частота изменения карты	0–60 (с шагом 10)	% карты за один такт
Максимальное число тактов моделирования	150	ед.
Алгоритм разрешения коллизий	без алгоритма/ парный/ полный	—

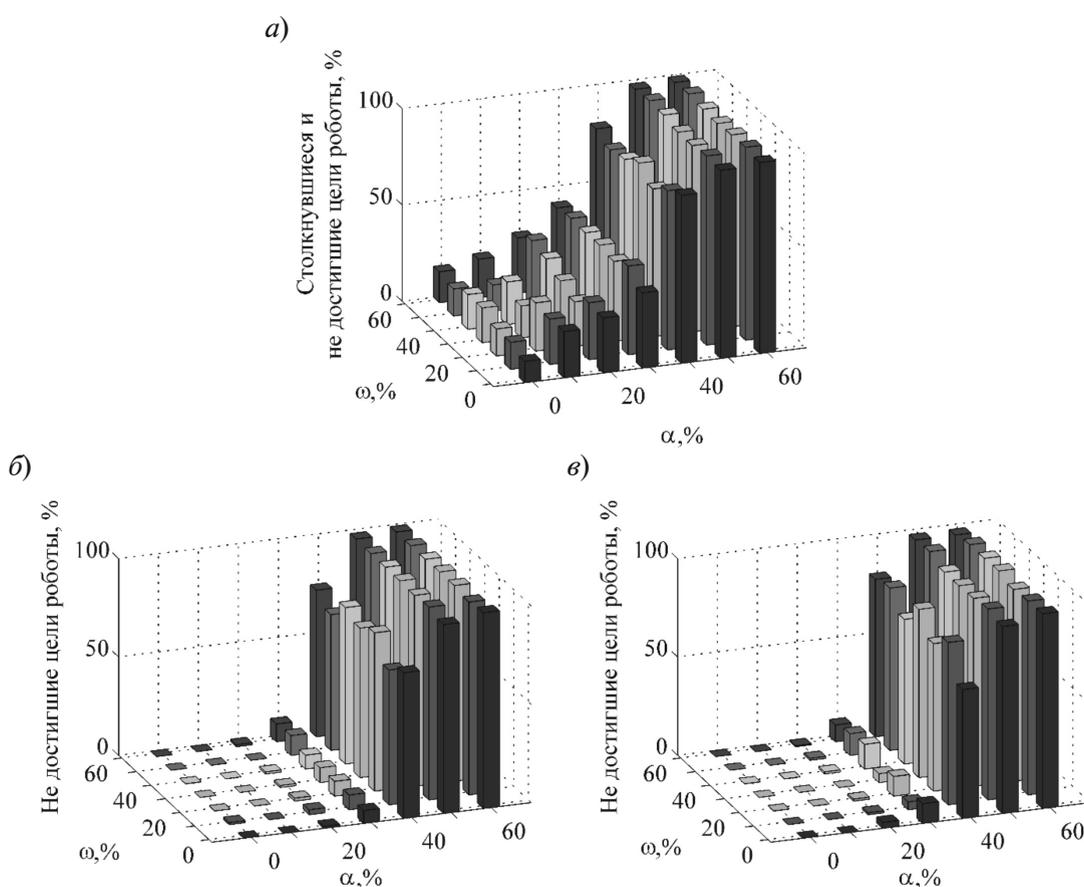


Рис. 2. Зависимость числа роботов, не достигших цели, от плотности заполнения карты препятствиями и частоты изменений для трех случаев: без применения алгоритма (а), с применением парного (б) и полного (в) алгоритмов

Fig. 2. Dependence of the relative number of robots that have not reached the goal from the density of the map filling with obstacles $\alpha = [0.60]$ %, and the frequency of changes in obstacles on the map $\omega = [0.60]$ %, for 20 robots

шения коллизий;
 время выполнения каждого алгоритма.
 Результаты моделирования представлены на рис. 2–5.
 На рис. 2 отображена зависимость относительного числа роботов, не достигших

цели, от плотности заполнения карты препятствиями $\alpha = [0,60] \%$ и частоты изменений препятствий на карте $\omega = [0,60] \%$, для 20 роботов.

Анализируя гистограммы, можно заключить, что основное влияние на число

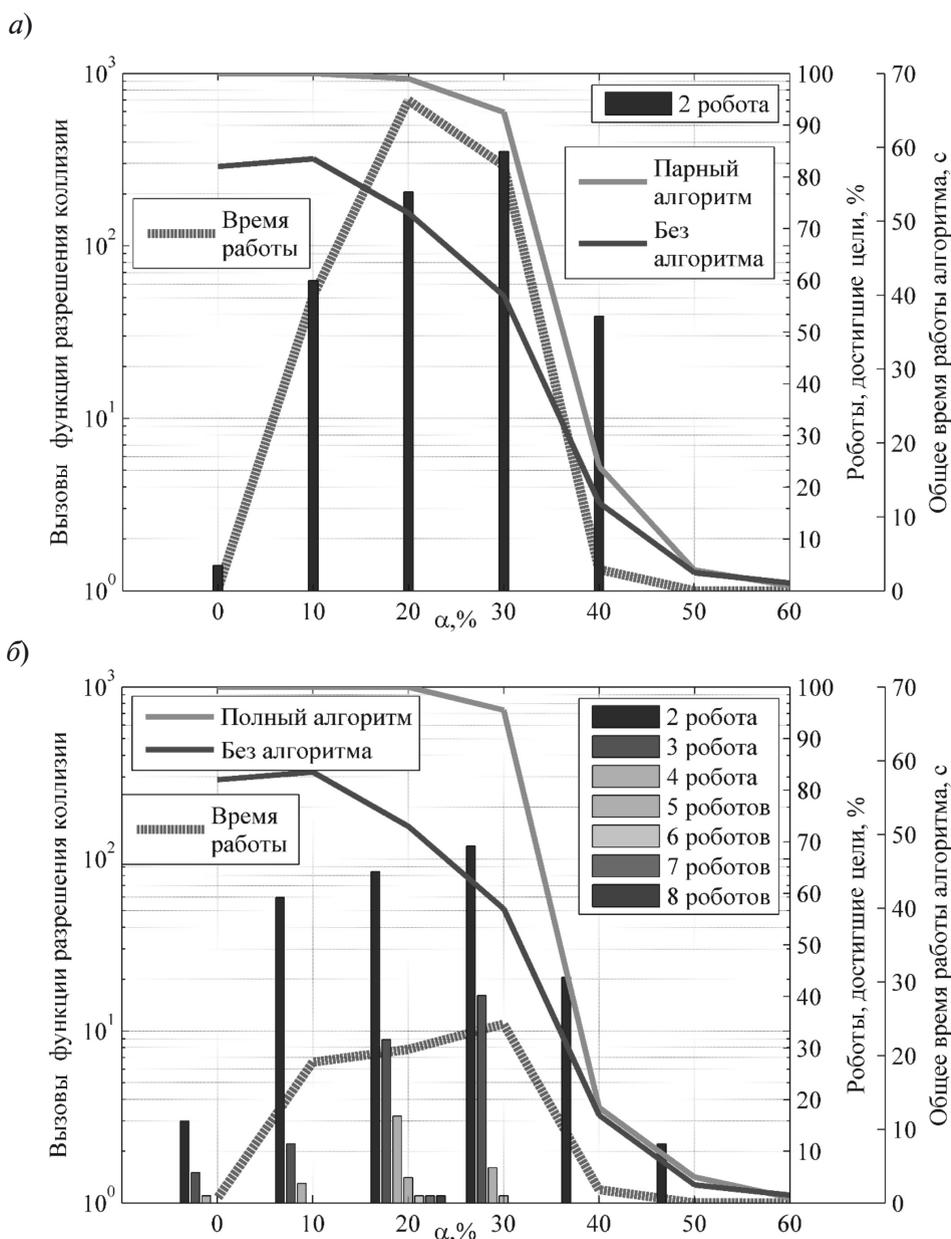


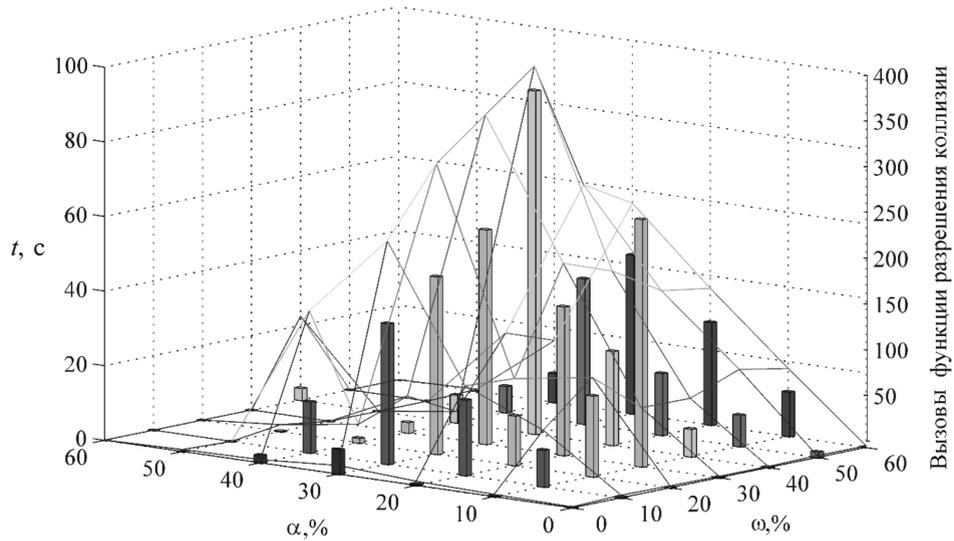
Рис. 3. Зависимость времени выполнения и числа вызовов функции разрешения коллизий и числа роботов, успешно достигших цели, для $\alpha = [0,60] \%$, $\omega = 30 \%$ и 20 роботов в случае парного (а) и полного (б) алгоритмов

Fig. 3. Dependence of running time and number of calls of the collision resolution function and the number of robots successfully reaching the goal for $\alpha = [0,60] \%$, $\omega = 30 \%$ and 20 robots in the case of pair (a) and full (b) algorithms

роботов, не достигших цели, оказывает заполнение карты препятствиями α , а частота изменений препятствий на карте ω влияния практически не оказывает. Применение алгоритмов разрешения коллизий существенно улучшает результат групповых действий

в диапазоне заполнения карты препятствиями α от 0 до 30 %, что связано с устранением столкновений роботов в процессе движения. Отсутствие эффекта от применения алгоритмов в диапазоне α от 40 до 60 % связано с отсутствием траекторий для

а)



б)

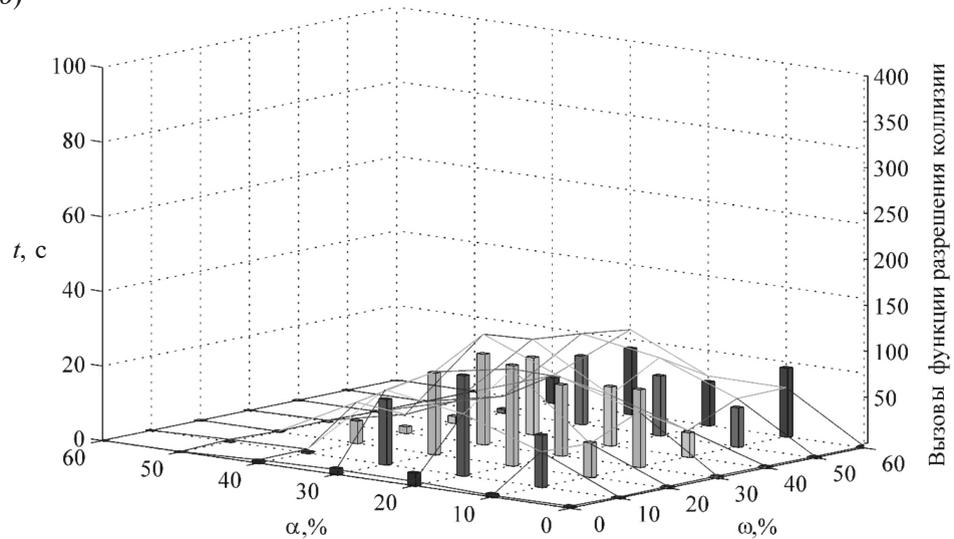


Рис. 4. Среднее время выполнения и число вызовов функции разрешения коллизии при заданной плотности заполнения препятствиями и частоте изменений их положения для парного (а) и полного (б) алгоритмов $\alpha = [0,60] \%$, $\omega = [0,60] \%$ карты, $Rn = 20$

Fig. 4. Average running time and the number of calls to the collision resolution function for a set obstacle density and the frequency of changes their position for pair (a) and full (b) algorithms $\alpha = [0.60] \%$, $\omega = [0.60] \%$ of the map, $Rn = 20$

достижения целей большую часть времени моделирования.

На рис. 3 представлена зависимость числа вызовов функций разрешения коллизий и суммарного времени её выполнения, числа достигших цели роботов для случаев без применения алгоритма и применения парного (а) и полного (б) алгоритмов. График рассмотрен для плотностей заполнения карты препятствиями α от 0 до 60 %, при фиксированной частоте изменений ω в 30 %. Число вызовов и время выполнения функции усреднено по всем циклам моделирования.

Использование любого из алгоритмов обеспечивает увеличение числа роботов, успешно достигших цели, в среднем на 30 % в диапазоне заполнением карты препятствиями α от 0 до 30 %, что связано с исключением выхода из строя роботов в след-

ствии столкновений. Сравнение времени функционирования алгоритмов показало, что парный вызывается в три раза чаще, чем полный, из-за чего и суммарное время вычислений больше в 2,5 раза. При этом сравнение среднего времени вычисления одной коллизии для полного алгоритма больше почти на 20 %, что связано с последовательным включением в группу роботов, траектории которых пересеклись с областью коллизий. Число роботов, попавших в одну область коллизии, растёт, начиная с заполнения карты препятствиями от нуля % и достигая максимума в восемь роботов при 20-процентном заполнении, а затем снижается. Это вызвано увеличением числа пересечений траекторий, из-за сокращения доступного для построения траекторий пространства. Дальнейшее снижение числа роботов в одной коллизии

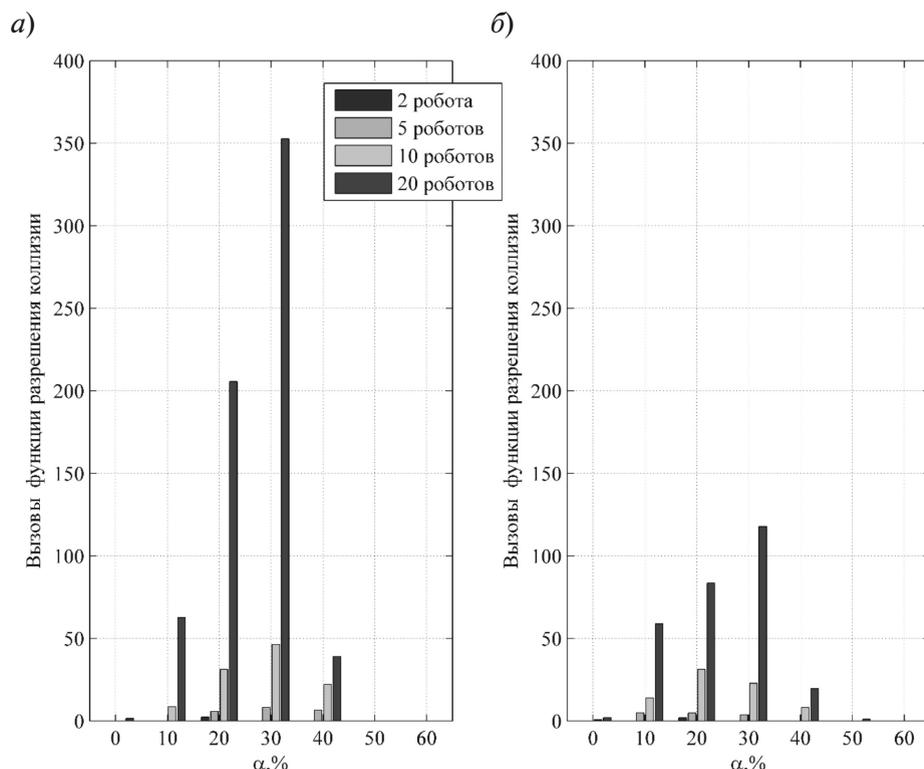


Рис. 5. Среднее количество вызовов функции разрешения коллизии для групп роботов при всех значениях заполнения препятствиями для парного (а) и полного (б) алгоритмов $\alpha = [0,60] \%$, $\omega = 30 \%$ карты, $Rn = [2, 5, 10, 20]$

Fig. 5. Average number of collision avoidance function calls for group of robots for pair (a) and full (b) algorithms $\alpha = [0.60] \%$, $\omega = 30 \%$ карты, $Rn = [2, 5, 10, 20]$

связано с отсутствием траекторий движения к целям большую часть времени моделирования.

На рис. 4 представлены среднее время выполнения и число вызовов функции разрешения коллизии при заданной плотности заполнения препятствиями и частоте изменений их положения для парного (а) и полного (б) алгоритмов.

Результаты, представленные на графике 4, демонстрируют трёхкратное превосходство в числе вызовов и среднем времени выполнения полного алгоритма разрешения коллизий в области заполнения препятствиями от 0 до 30 % и всех диапазонах частот изменения, что связано с линейным разрешением коллизий в групповом алгоритме и рекурсивным – в парном, что связано с особенностями выбора эвристики группового алгоритма.

На рис. 5 представлено среднее количество вызовов функции разрешения коллизии для групп роботов при частоте изменения карты в 30 % и всех значениях заполнения препятствиями для парного (а) и полного (б) алгоритмов.

Характер изменения зависимости числа вызовов функции разрешения коллизий от процента заполнения карты не зависит от числа роботов в группе: оно растёт от нуля до 30 % и далее снижается для диапазона от 40 до 60 % для группы любого размера.

Выводы

В работе исследованы три подхода к разрешению коллизий: игнорирование коллизий, разрешение всех коллизий последовательно для пар роботов и разрешение коллизий последовательным расширением группы роботов. Лучшие результаты как относительно достижения цели, так и относительно временных затрат на вычисления показал третий подход. При его применении число роботов, достигших цели, увеличилось в среднем на 25 % по сравнению с подходом, состоящим в игнорировании коллизий на малом и среднем объёме заполнения карты препятствиями на всех диапазонах динамики карты. Схожие результаты показал второй подход, однако, его вычислительные затраты в 2,5 раза выше третьего.

В продолжении работы планируется ввести адаптацию вызовов алгоритма на основе анализа частоты наблюдаемых изменений на карте, ограничить количество вызовов функций поиска и разрешения коллизий в зависимости от необходимости корректировки пути, а также глубину анализа наличия коллизий.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ, грант № 16-29-04319 «Контекстно-ориентированные методы принятия решений и планирования операций смешанной группой мобильных роботов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dit-Yan Yeung G., Bekey A.** A decentralized approach to the motion planning problem for multiple mobile robots // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation. 1987.
2. **Bretl T., Hutchinson S.** Robust Coverage by a Mobile Robot of a Planar Workspace // Proc. of the Internat. Conf. on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany, 2013. Pp. 4582–4587.
3. **Borenstein J., Koren Y.** Obstacle avoidance with ultrasonic sensors // IEEE Journal on Robotics and Automation. 1988. Vol. 4. Iss. 2. Pp. 213–218.
4. **Трушин А.М.** Определение коллизий аппроксимирующих сфер и прямоугольных параллелепипедов в системах трехмерного моделирования // Программные продукты и системы. 2015. № 4 (112). С. 105–109.
5. **Ericson C.** Real-Time Collision Detection. CRC Press, 2004. 594 p.
6. **De Luca A., Ferrajoli L.** Exploiting Robot Redundancy in Collision Detection and Reaction // Proc. of the IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Acropolis Convention Center, Nice, France, 2008.
7. **Liyana Adilla Burhanuddin, Md Nazrul Islam, Suhaila Mohd Yusof** Evaluation of Collision Avoidance Path Planning Algorithm // Proc. of the Internat. Conf. on Research and Innovation in Information Systems. 2013. Pp. 360–365.
8. **Borrmann U., Wang Li, Ames A.D., Egerstedt M.** Control barrier certificates for safe swarm behavior // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48. Iss. 27. Pp. 068–073.
9. **Abrar M. Alajlan, Marwah M. Almasri, Khaled M. Elleithy** Multi-Sensor Based Collision Avoidance Algorithm for Mobile Robot // IEEE Long Island Systems, Applications and Technology.

Long Island, NY, 2015.

10. **Svestka P., Overmars M.H.** Coordinated path planning for multiple robots // *Robotics and Autonomous Systems*. 1998. Pp. 125–152.

11. **Parker L.E.** Path Planning and Motion Coordination in Multiple Mobile Robot Teams // *Encyclopedia of Complexity and System Science*. Springer, 2009.

12. **Luo W., Chakraborty N., Sycara K.** Distributed dynamic priority assignment and motion planning for multiple mobile robots with kinodynamic constraints // *American Control Conf.* 2016. Pp. 148–154.

13. **Shuang Liu, Dong Sun, Changan Zhu** Coordinated motion planning of multiple mobile robots in formation // *8th World Congress on Intelligent Control and Automation*. 2010. Pp. 1806–1811.

14. **Попов С.Г., Моторин Д.Е.** Исследование алгоритмов индивидуальной и групповой стратегии движения автономных мобильных роботов на динамической карте // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2016. № 2(241). С. 45–57. DOI: 10.5862/JCSTCS.241.5.

15. **Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. С. 110–112.

16. **Kakavand M., Aria Alasty A.** Coordinated Trajectory Tracking and Collision-Avoidance in

Dynamic Environment for Robots with Double-Integrated Nonlinear Dynamics // *Proc. of the RSI/ISM Internat. Conf. on Robotics and Mechatronics*. Tehran, Iran, 2014. Pp. 357–363.

17. **Wang Xu, Kloetzer M., Mahulea C., Silva M.** Collision avoidance of mobile robots by using initial time delays // *Proc. of the IEEE 54th Annual Conf. on Decision and Control*. Osaka, Japan, 2015. Pp. 324–329.

18. **Juntao Li, Tingting Dong, Li Yuanyuan, Yan Hao** Study on robot path collision avoidance planning based on the improved ant colony algorithm // *Proc. of the 8th Internat. Conf. on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. Hangzhou, China, 2016. Pp. 540–544.

19. **Wang Li, Ames A.D., Egerstedt M.** Multi-objective Compositions for Collision-Free Connectivity Maintenance in Teams of Mobile Robots // *Proc. of the 55th Conf. on Decision and Control*. Las Vegas, USA, 2016. Pp. 2659–2664.

20. **Rainer Palm, Abdelbaki Bouguerra, Muhammad Abdullah, Achim J. Lilienthal** Navigation in Human-Robot and Robot-Robot Interaction using Optimization Methods // *Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*. Budapest, Hungary, 2016. Pp. 4489–4494.

21. **Yuan Zhou, Hesuan Hu, Yang Liu, Zuohua Ding** Collision and Deadlock Avoidance in Multirobot Systems: A Distributed Approach // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems*. 2017. Iss. 99. Pp. 1–15.

Статья поступила в редакцию 12.12.2016

REFERENCES

1. **Dit-Yan Yeung G. Bekey** A decentralized approach to the motion planning problem for multiple mobile robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, March, 1987.

2. **Bretl T., Hutchinson S.** Robust Coverage by a Mobile Robot of a Planar Workspace. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, May, 2013, Pp. 4582–4587.

3. **Borenstein J., Koren Y.** Obstacle avoidance with ultrasonic sensors. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1988, Vol. 4, Iss. 2, Pp. 213–218.

4. **Trushin A.M.** Opredeleniye kolliziyi approssimiruyushchikh sfer i pryamougolnykh parallelepipedov v sistemakh trekhmernogo modelirovaniya. *Programmnyye produkty i sistemy [Software & Systems]*, 2015, No. 4 (112), Pp. 105–109. (rus)

5. **Ericson C.** *Real-Time Collision Detection*. CRC Press, 2004, 594 p.

6. **De Luca A., Ferrajoli L.** Exploiting Robot Redundancy in Collision Detection and Reaction. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Acropolis Convention Center, Nice, France, Sept, 22–26, 2008.

7. **Liyana Adilla Burhanuddin, Md Nazrul Islam, Suhaila Mohd Yusof** Evaluation of Collision Avoidance Path Planning Algorithm. *Proceedings of the International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS)*, 2013, Pp. 360–365.

8. **Borrmann U., Wang Li, Ames A.D., Egerstedt M.** Control barrier certificates for safe swarm behavior. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, Vol. 48, Iss. 27, Pp. 068–073.

9. **Abrar M. Alajlan, Marwah M. Almasri, Khaled M. Elleithy** Multi-Sensor Based Collision Avoidance Algorithm for Mobile Robot. *IEEE Long Island Systems, Applications and Technology LISAT 2015*, Long Island, NY, 2015.

10. **Svestka P., Overmars M.H.** Coordinated path planning for multiple robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 1998, No. 23, Pp. 125–152.
11. **Parker L.E.** Path Planning and Motion Coordination in Multiple Mobile Robot Teams. *Encyclopedia of Complexity and System Science*. Springer, 2009.
12. **Luo W., Chakraborty N., Sycara K.** Distributed dynamic priority assignment and motion planning for multiple mobile robots with kinodynamic constraints. *American Control Conference*, 2016, Pp. 148–154.
13. **Shuang Liu, Dong Sun, Changan Zhu** Coordinated motion planning of multiple mobile robots in formation. *8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 2010, Pp. 1806–1811.
14. **Popov S.G., Motorin D.Ye.** Issledovaniye algoritmov individualnoy i gruppovoy strategii dvizheniya avtonomnykh mobilnykh robotov na dinamicheskoy karte [A Research of the Algorithms of Individual and Group Movement Strategies of Autonomous Mobile Robots on a Dynamic Map]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniya [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems]*, 2016, No. 2(241), Pp. 45–57. DOI: 10.5862/JCSTCS.241.5 (rus)
15. **Kalyayev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.** *Modeli i algoritmy kolektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective management in groups of robots]*. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2009, Pp. 110–112. (rus)
16. **Kakavand M., Aria Alasty A.** Coordinated Trajectory Tracking and Collision-Avoidance in Dynamic Environment for Robots with Double-Integrated Nonlinear Dynamics. *Proceedings of the RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran, Iran, Oct., 2014, Pp. 357–363.
17. **Wang Xu, Kloetzer M., Mahulea C., Silva M.** Collision avoidance of mobile robots by using initial time delays. *Proceedings of the IEEE 54th Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, Osaka, Japan, Dec., 2015, Pp. 324–329.
18. **Juntao Li, Tingting Dong, Li Yuanyuan, Yan Hao** Study on robot path collision avoidance planning based on the improved ant colony algorithm. *Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Hangzhou, China, Dec., 2016, Pp. 540–544.
19. **Wang Li, Ames A.D., Egerstedt M.** Multi-objective Compositions for Collision-Free Connectivity Maintenance in Teams of Mobile Robots. *Proceedings of the 55th Conference on Decision and Control (CDC)*, Las Vegas, USA, Dec., 2016, Pp. 2659–2664.
20. **Rainer Palm, Abdelbaki Bouguerra, Muhammad Abdullah, Achim J. Lilienthal** Navigation in Human-Robot and Robot-Robot Interaction using Optimization Methods. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Budapest, Hungary, Oct., 2016, Pp. 4489–4494.
21. **Yuan Zhou, Hesuan Hu, Yang Liu, Zuohua Ding** Collision and Deadlock Avoidance in Multirobot Systems: A Distributed Approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics System*, 2017, Iss. 99, Pp. 1–15.

Received 12.12.2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

МОТОРИН Дмитрий Евгеньевич
MOTORIN Dmitrii Ye.
E-mail: d.e.motorin@gmail.com

ПОПОВ Сергей Геннадьевич
POPOV Sergey G.
E-mail: popovserge@spbstu.ru

КУРОЧКИН Леонид Михайлович
KUROCHKIN Leonid M.
E-mail: kurochkinl@spbstu.ru

DOI: 10.18721/JCSTCS.10204

УДК 621.37

ЭКРАНИРОВАННАЯ КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОПОРНОГО СВЧ-ГЕНЕРАТОРА С ТОРЦЕВЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДИСКОВОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

Е.В. Егоров, В.М. Малышев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Приведены результаты моделирования экранированной колебательной системы (КС) с дисковым диэлектрическим резонатором (ДДР) на резонансных частотах, лежащих вблизи 10 ГГц. Определены параметры КС, влияющие на нагруженную добротность и потери резонансной системы. Приведена компактная конструкция такой колебательной системы, возбуждаемой торцевым образом и предназначенной для создания опорного автогенератора (ОАГ) в гибридном исполнении. Приведены результаты моделирования и измерений характеристик компактной КС. Даны оценки уровней фазовых шумов (ФШ), достигаемых в ОАГ при применении такой КС. При размерах алюминиевой полости колебательной системы 28×8 мм и собственной добротности ДДР 10 000 при применении малошумящих SiGe биполярных транзисторов в ОАГ возможно достичь уровня ФШ –130 дБ/Гц на частотах анализа 10 кГц.

Ключевые слова: колебательная система; автогенератор; диэлектрический резонатор; фазовый шум; формула Лисона.

Ссылка при цитировании: Егоров Е.В., Малышев В.М. Экранированная колебательная система опорного СВЧ-генератора с торцевым возбуждением дискового диэлектрического резонатора // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 45–57. DOI: 10.18721/JCSTCS.10204

OSCILLATING SYSTEM OF A REFERENCE MICROWAVE GENERATOR WITH SCREENED DIELECTRIC RESONATOR EXCITED FROM AN END FACE

E.V. Egorov, V.M. Malyshev

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

The paper considers the simulation results of an oscillating system with a dielectric resonator at 10 GHz. The model was designed using CAD simulation in HFSS. The oscillating system with a dielectric resonator in a metal cavity is considered.

To minimize the phase noise of the oscillator, the resonator must be designed to have a high quality factor. The high quality factor is obtained by using the dielectric resonator in a metal cavity. Three types of metal cavities are analyzed and the parameters affecting their quality factor and losses are identified. The compact design of the resonator excited from the end face for the oscillator in hybrid form and the results of modeling and measuring the characteristics of the oscillating systems are given. Using these results, the phase noise level which can be reached in oscillators was assessed. With the dimensions of the aluminum cavity of the oscillating system of 28×8 mm and the inherent Q-factor of the DDR equal to 10000, using low-noise SiGe bipolar transistors in the self-excited oscillator, it is possible to reach the phase noise level of –130 dB/Hz at the analyzed frequencies of 10 kHz.

Keywords: oscillating system; oscillator; dielectric resonator; phase noise; Lison's formula.

Citation: Egorov E.V., Malyshev V.M. Oscillating system of a reference microwave generator with screened dielectric resonator excited from an end face. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 1, Pp. 45–57. DOI: 10.18721/JCSTCS.10204

Малошумящие опорные автогенераторы (ОАГ) являются неотъемлемой частью приемо-передающих блоков многих радиотехнических систем. Низкий уровень фазовых шумов (ФШ) ОАГ важен для систем связи, радиолокации, радионавигации, телеметрии, а также для измерительных и многих других систем. Например, в аналоговых системах связи рост фазовых шумов приводит к ухудшению чувствительности и избирательности систем, а в системах связи с цифровой модуляцией – к ухудшению их характеристик по модулю вектора ошибки. В радиолокационных системах уровень ФШ также влияет на пространственное разрешение и точность определения скорости объекта.

Требования к уровню ФШ ОАГ во многом зависят от области применения. Наиболее высокие требования по уровню ФШ обычно предъявляются к прецизионным анализаторам фазовых шумов. Например, уровень ФШ внутреннего гетеродина в высокочувствительном анализаторе фазового шума R&S®FSWP фирмы Rohde & Schwarz на рабочей частоте 10 ГГц при частоте анализа 10 кГц достигает значения –133 дБ/Гц¹. Низкие уровни

ФШ в таких изделиях достигаются как за счет применения уникальных компонент ОАГ, так и за счет усложнения его схемы [1]. Все это приводит к росту габаритов изделия и его стоимости. На практике часто требуются компактные опорные автогенераторы небольшой стоимости, имеющие приемлемый уровень фазовых шумов. К таким опорным генераторам относятся ОАГ с колебательной системой (КС) на основе диэлектрического резонатора (ДР).

Колебательная система, входящая в состав любого автогенератора (АГ), определяет его частоту колебаний и влияет на его фазовые шумы. В соответствии с известной моделью Лисона увеличение нагруженной добротности колебательной системы Q_n , входящей в обратную связь (ОС) АГ, приводит к уменьшению уровня ФШ [2]. Для уменьшения габаритов ОАГ в качестве стабилизирующего элемента КС часто применяют диэлектрические резонаторы, работающие в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц. Обычно они имеют форму дисков, так называемые дисковые диэлектрические резонаторы (ДДР). Реже (из-за близости высших видов колебаний) применяют ДР в виде цилиндров – ДРЦ. ДР в форме прямоугольных образцов и более сложных форм сегодня практически не используются, поскольку уступают в технологичности и добротности [3]. ДДР имеют высокую собственную добротность Q_0 , которая, как правило, линейно уменьшается с частотой.

¹ Анализатор фазового шума R&S®FSWP. Прецизионный анализ источников сигналов и СВЧ-компонентов // URL: https://www.rohde-schwarz.ru/data/catalog_files/ (Дата обращения: 19.04.2017).

Значение Q_0 для некоторых используемых материалов может достигать 10 000 на частоте 10 ГГц² и даже более. Это позволяет создавать компактные твердотельные ОАГ с механической перестройкой частоты, обладающие низким уровнем фазовых шумов, достаточным для обеспечения нормальной работы многих радиотехнических систем. Например, для ОАГ с рабочей частотой 10 ГГц, построенном на многокаскадном SiGe усилителе с КС, использующей ДР с Q_0 равной 22 000, достигнут уровень ФШ менее -135 дБ/Гц на частоте анализа 10 кГц [4].

Малогобаритные ОАГ изготавливают в микрополосковом исполнении с включением ДР по схеме «на отражение» или по схеме «на проход» [5]. Для уменьшения потерь на излучение ДР размещается в металлической полости с достаточно большим удалением от ее стенок. Следует отметить, что существует несколько конструкций такого рода ОАГ. В наиболее простых с технологической точки зрения конструкциях автогенератор и колебательная система с ДР устанавливаются на одной диэлектрической плате, размещенной в металлической полости, обычно выполненной в виде параллелепипеда [6]. Недостатком такой конструкции является влияние элементов АГ на параметры КС, что, в конечном счете, приводит к увеличению уровня ФШ таких ОАГ.

Уменьшение влияния АГ можно обеспечить или за счет отдаления ДР от схемы автогенератора, или за счет его полного экранирования [7, 8]. Оба этих способа естественно ведут к увеличению поперечных размеров ОАГ. Причем в случае полного экранирования необходимо выбрать способ связи ДР со схемой АГ, обеспечивающий необходимый коэффициент связи, а также компактный способ построения ОАГ.

Например, в [7] приведена конструкция ОАГ с КС на ДДР, выполненной в виде металлической цилиндрической полости. Связь ДДР со схемой АГ осуществляется

с помощью элементов связи, проходящих через боковую поверхность цилиндра. Это приводит к значительному росту размера ОАГ. Меньшими размерами обладает опорный автогенератор, присоединенный к КС с помощью элементов связи, проходящих через основание цилиндрической полости, что позволяет расположить с обратной стороны основания плату АГ и соответственно уменьшить размеры ОАГ. Такая компактная конструкция ОАГ с КС в виде прямоугольного металлического резонатора с диэлектриком приведена в [9]. Однако в литературе практически нет сведений о конструкциях КС подобного вида, выполненных с применением ДДР.

В статье приведены результаты моделирования в САПР HFSS компактной колебательной системы, выполненной в виде призматической металлической полости с дисковым ДР, включенным в микрополосковом исполнении по схеме «на проход». Возбуждение КС осуществляется с помощью элементов связи, включенных через основание призмы снизу микрополосковой платы с ДР, что и обеспечивает создание компактной конструкции ОАГ. Резонансная частота КС лежит вблизи 10 ГГц и может механически перестраиваться в пределах ± 200 МГц. Рассмотрены также результаты экспериментальных измерений характеристик макета такой конструкции КС. Для определения перспектив использования разработанной конструкции КС в ОАГ даны оценки уровня их фазовых шумов.

Обоснование выбора конструкции и размеров КС

Резонансные свойства КС с ДР во многом определяются параметрами диэлектрического резонатора. Выбор ДР основывался на доступности таких резонаторов при достаточно высокой их собственной добротности и относительно низком температурном коэффициенте резонансной частоты.

Был выбран ДДР фирмы Token на подставке типа TE36-10BS. Основная рабочая мода этого резонатора TE01δ. Эти ДДР обладают достаточно высокой собственной добротностью $Q_0 = 10\,000$ на рабочей ча-

² Каталог продукции ООО «Керамика» // URL: www.ceramics.sp.ru (Дата обращения: 19.04.2017).

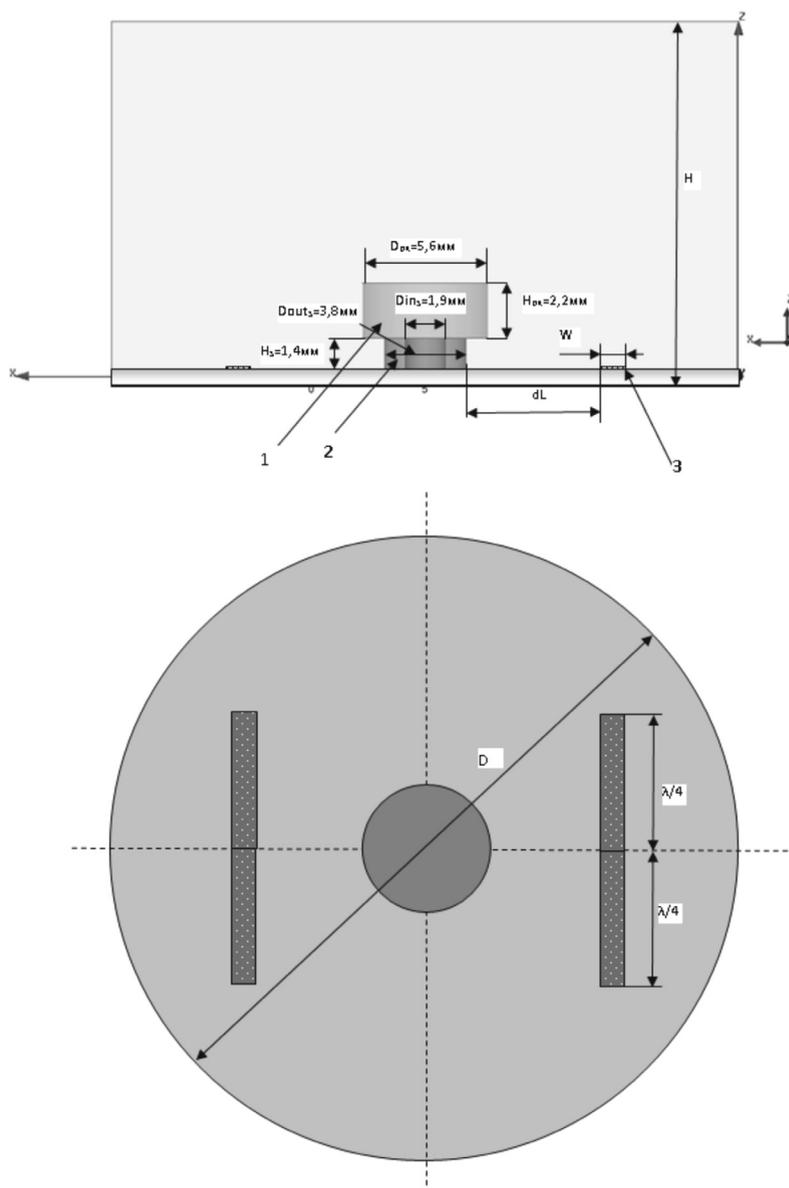


Рис. 1. Размеры диэлектрического резонатора TE36-10BS, установленного в КС с цилиндрической металлической полостью:
1 – ДР; 2 – подставка; 3 – МПЛ

Fig. 1. Dimensions of the dielectric resonator TE36-10BS, installed in the oscillating system with a cylindrical metal cavity:
1 – DR; 2 – dielectric support; 3 – microstrip

стоте 10 ГГц и имеют температурный коэффициент резонансной частоты не более $3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}^3$.

³ Token TE01 (Dielectric Resonators Materials // URL: <http://www.token.com.tw> (Дата обращения: 19.04.2017).

Размеры ДДР приведены на рис. 1. ДДР устанавливается по схеме «на проход» между микрополосковыми линиями (МПЛ) с волновым сопротивлением 50 Ом и длиной $\lambda/2$, где λ – длина волны в МПЛ. В качестве подложки МПЛ использовался материал RO-4003C с толщиной диэлектрика

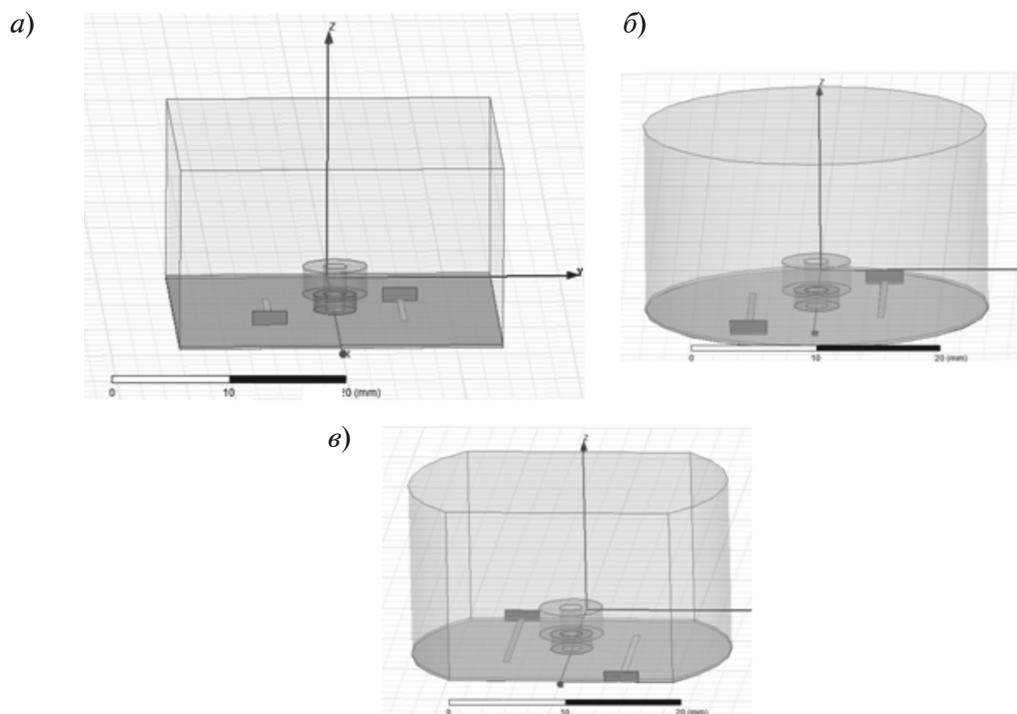


Рис. 2. Виды моделируемых полостей с ДР:
a – параллелепипед; *б* – цилиндр; *в* – усеченный цилиндр

Fig. 2. Types of simulated cavities with DR:
a – parallelepiped; *b* – cylinder; *c* – truncated cylinder

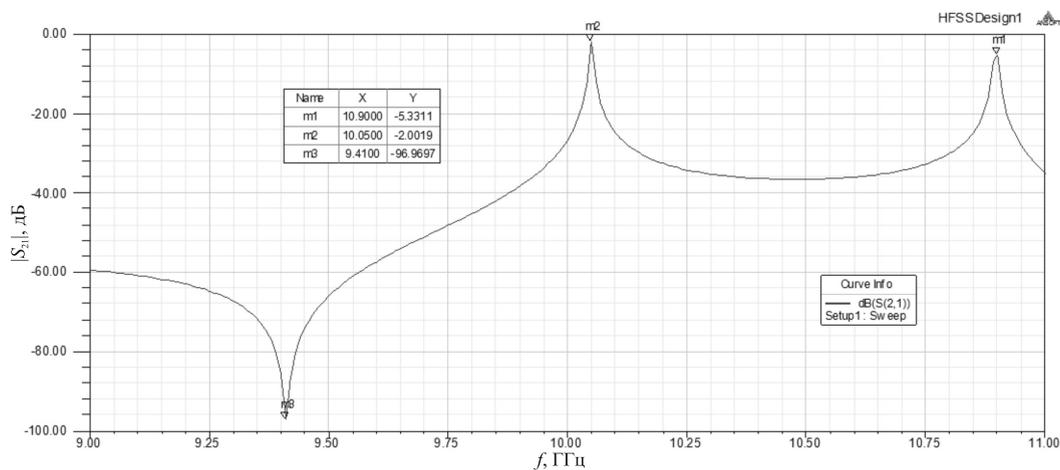


Рис. 3. Зависимость модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$ от частоты f

Fig. 3. The frequency f dependence of the transmission coefficient $|S_{21}|$

0,508 мм и толщиной медного покрытия 17 мкм⁴. Для уменьшения потерь на излу-

чение ДР размещался в металлической полости с достаточно большим удалением его от стенок полости. Выбор вида полости и ее размеры были определены на основе моделирования в САПР HFSS.

⁴RO4000® Series High Frequency Circuit Materials. Data Sheets. Rogers Corporation // URL: <http://www.rogerscorp.com> (Дата обращения: 19.04.17).

Было проведено моделирование КС

для трех видов металлической полости: в виде параллелепипеда, прямого кругового цилиндра и прямого усеченного цилиндра (рис. 2).

В качестве граничных условий использовались границы с конечной проводимостью (материал-медь). Возбуждение КС осуществлялось с помощью дискретных портов [10].

Как показало моделирование, нагруженная добротность колебательной системы Q'' достигает значений больших половины Q_0 только на достаточно больших расстояниях МПЛ относительно центра конструкций (до 9 мм). Поэтому диаметры цилиндрических конструкций D (см. рис. 1) и размеры оснований параллелепипедов были выбраны более 18 мм. Влияние высоты полости H (см. рис. 1) проявлялось при H меньших 14 мм. Поэтому большинство опытов было проведено для H не более 20 мм.

В процессе моделирования рассчитывались S -параметры КС. Частотные зависимости модулей коэффициентов передачи $|S_{21}|$ показали наличие двух резонансов в диапазоне частот от 9 до 12 ГГц (рис. 3).

Первый резонанс находится вблизи резонансной частоты $f_{\text{рез } 1}$ равной 10 ГГц, а второй резонанс расположен вблизи $f_{\text{рез } 2}$ равной 11 ГГц. На величину резонансной частоты влияет как вид резонансной системы, так и ее размеры. Моделирование структуры электрического и магнитного полей на разных резонансных частотах показал, что резонанс вблизи частоты $f_{\text{рез } 1}$ вызван взаимодействием поля ДР и МПЛ, а резонанс вблизи $f_{\text{рез } 2}$ обусловлен взаимодействием поля ДР, металлической полости и МПЛ. Это также подтверждается и более низкой добротностью резонансной кривой вблизи $f_{\text{рез } 2}$. Значения резонансных частот $f_{\text{рез } 1}$, $f_{\text{рез } 2}$ и добротности резонансных кривых Q_1 , Q_2 зависят от вида и размеров КС, но всегда при больших значениях добротностей (более 1000) $Q_1 > Q_2$. Причем при равных расстояниях между МПЛ и ДР, одинаковых высотах полости H и близких поперечных размерах РС добротность Q_1 цилиндрической полости обычно немного больше, чем у полостей, выполненных в виде параллелепипеда и усеченного цилиндра.

Это дало основание выбрать для проведения более детальных исследований КС, использующую цилиндрическую полость.

Исследовались зависимости параметров КС (резонансных частот $f_{\text{рез } 1}$, $f_{\text{рез } 2}$, добротностей резонансных кривых Q_1 , Q_2 и модулей коэффициентов передачи $|S_{21}|(f = f_{\text{рез } 1})$, $|S_{21}|(f = f_{\text{рез } 2})$), от размеров КС: расстояния dL между краем МПЛ и подставкой ДДР (рис. 4), диаметра полости D и высоты полости H (рис. 5).

Увеличение расстояния dL приводит к росту резонансной частоты $f_{\text{рез } 1}$ и незначительному изменению резонансной частоты $f_{\text{рез } 2}$. При этом добротности резонансных кривых и их потери растут. Более значительный рост наблюдается для добротности Q_1 и потерь резонатора $L_{21}(f = f_{\text{рез } 1}) = 1/|S_{21}|(f = f_{\text{рез } 1})$. Это подтверждает предположение о том, что резонанс вблизи частоты $f_{\text{рез } 1}$ вызван взаимодействием поля ДР и МПЛ. Изменение диаметра D и высоты H полости также влияют на параметры КС: с ростом D и H добротность Q_1 и потери $L_{21}(f = f_{\text{рез } 1})$ падают.

Полученные зависимости параметров КС от ее размеров использовались для определения габаритов КС, применяемой в ОАГ. Известно, что с ростом нагруженной добротности КС всегда наблюдается увеличение потерь резонатора. И это всегда учитывается при проектировании АГ. В зависимости от поставленных целей проектирования автогенераторов могут потребоваться разные потери резонатора. Например, для простого автогенератора с обратной связью для получения минимума фазового шума рекомендуется выбрать нагруженную добротность резонатора равной половине собственной добротности резонатора ($Q_H = Q_0/2$), что соответствует потерям в резонаторе 6 дБ [1].

Для определения размеров КС предполагалось, что в ОАГ используется усилитель с коэффициентом усиления не более 10 дБ. Поэтому для обеспечения самовозбуждения автогенератора потери резонатора не должны превышать 8 дБ. Как видно из рис. 4, для получения потерь $L_{21}(f = f_{\text{рез } 1})$ менее 8 дБ необходимо, чтобы расстояние dL было не более 7 мм. Результаты модели-

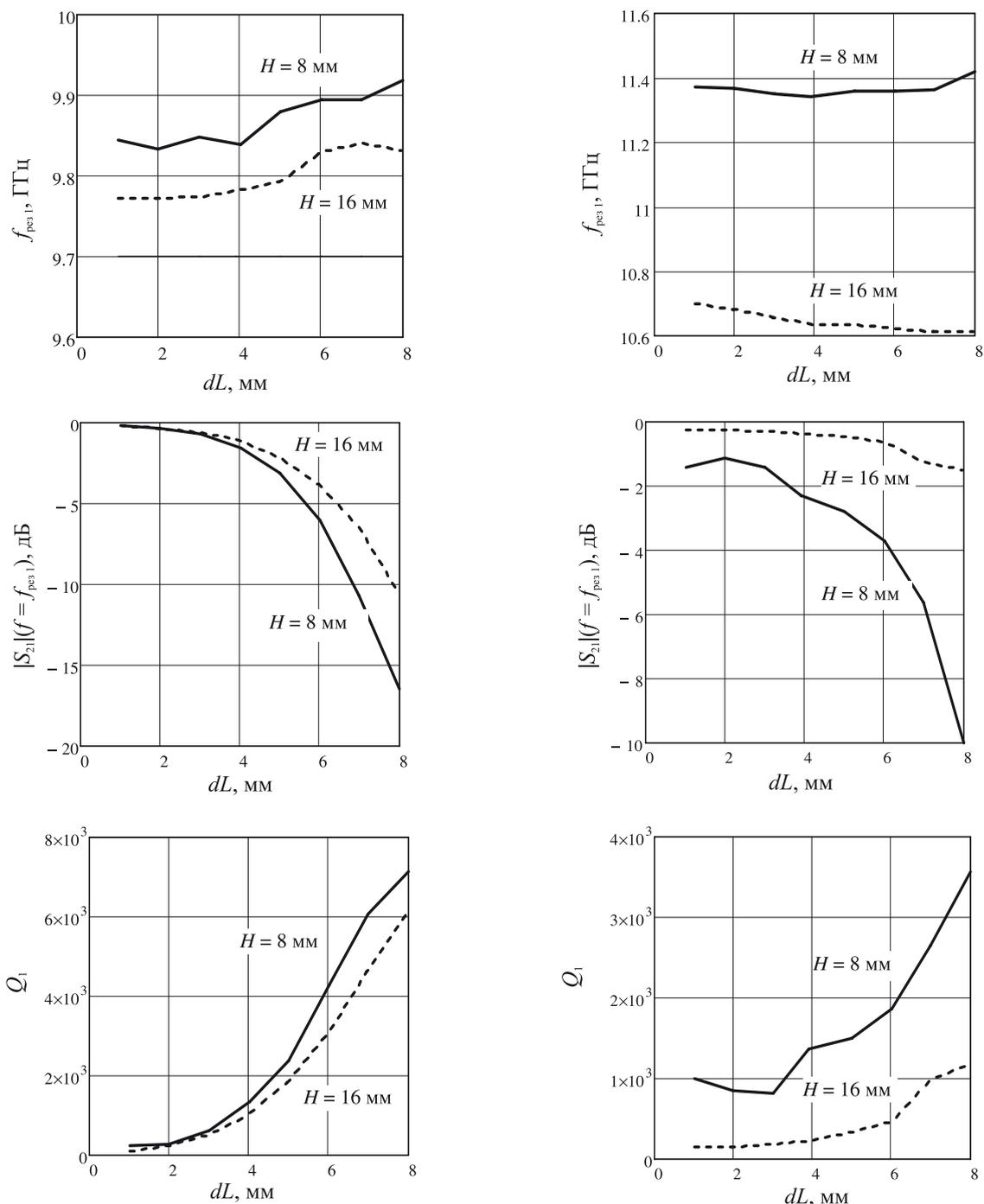


Рис. 4. Зависимости параметров КС от расстояния dL ($D = 28$ мм)

Fig. 4. The dependence of oscillating system parameters on distance dL ($D = 28$ mm)

рования, приведенные на рис. 5, позволяют определить также диаметр и высоту полости, обеспечивающие заданные потери. Видно, что добротность Q_1 незначительно уменьшается с ростом диаметра D . Потери

при резонатора $L_{21}(f = f_{\text{рез } 1})$ также падают с ростом D . Поэтому для получения потерь резонатора менее 8 дБ при dL более 5 мм следует выбирать диаметр полости не менее 26 мм. Изменение высоты H в пределах от

5 до 10 мм приводит к уменьшению добротности Q_1 практически в два раза. При этом также уменьшаются и потери резонатора. Для dL равного 6 мм это уменьшение до-

стигает 5 дБ. Поэтому для получения потерь резонатора менее 8 дБ для dL более 5 мм следует выбирать высоту полости не менее 7 мм.

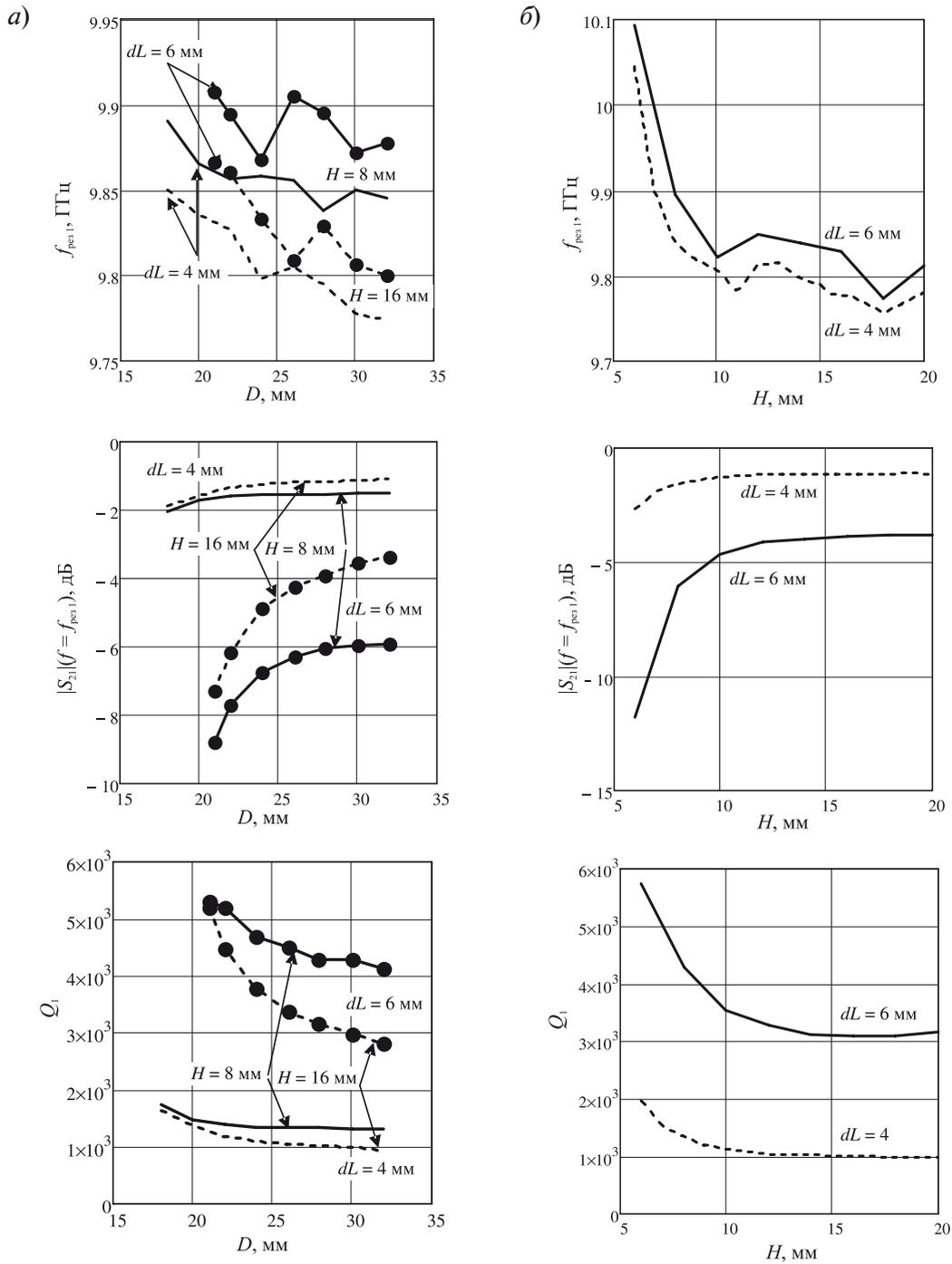


Рис. 5. Зависимости параметров КС от:
а – диаметра полости D ; б – высоты полости H ($D = 28$ мм)

Fig. 5. The dependence of oscillating system parameters on:
а – cavity diameter D ; б – cavity height H ($D = 28$ мм)

Для обеспечения механической перестройки частоты КС используются настроечные винты, изменяющие эквивалентные реактивные элементы контура. В рассматриваемой модели КС настроечный винт

располагается вдоль оси симметрии и вкручивается в верхнее основание полости. Результаты моделирования показали, что при диаметре настроечного винта D_c равного 5 мм возможно добиться перестройки ча-

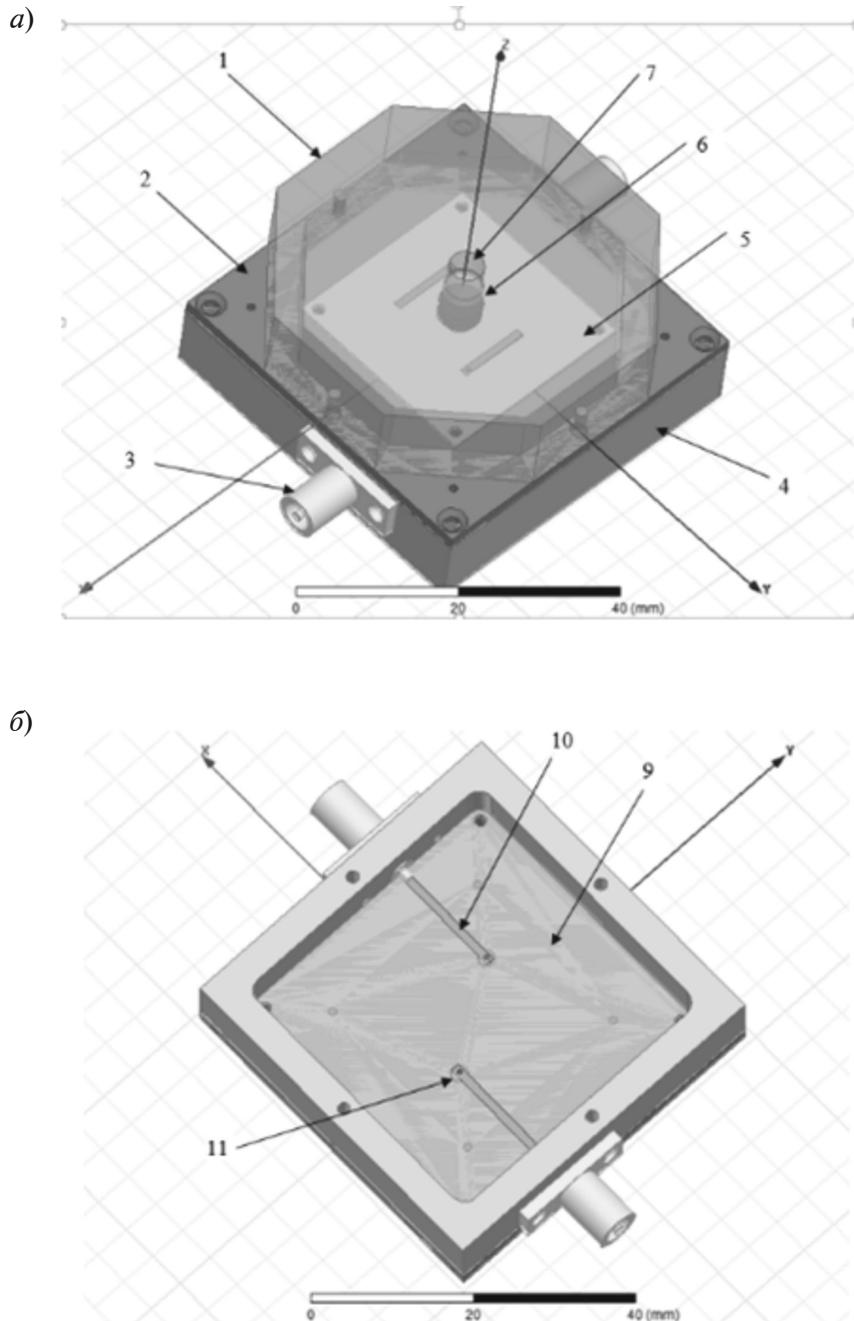


Рис. 6. Макет КС с ДР с «торцевым» возбуждением МПЛ:
a – вид сверху; *б* – вид снизу со снятой крышкой

Fig. 6. Oscillating system model with dielectric resonator excited from an end face:
a – above view; *b* – bottom view with cover removed

стоты 400 МГц при изменении потерь на резонансной частоте не более, чем на 1 дБ.

Описание макета колебательной системы

Результаты моделирования использовались для разработки макета КС с ДР с «торцевым» возбуждением МПЛ (рис. 6). Такая конструкция, как отмечалось выше, позволяет уменьшить габаритные размеры ОАГ. Из-за технологических трудностей в качестве металлической полости использовалась восьмигранная призматическая полость, наиболее близкая к цилиндрической.

Макет состоит из алюминиевой призматической полости 1; алюминиевого основания 2, на которое с одной стороны устанавливается «верхняя» микрополосковая плата 5, а с другой стороны – «нижняя» микрополосковая плата 9; рамы 4, на которой установлены SMA разъемы 3 и основание 2. На «верхней» микрополосковой плате располагается ДР 6. Нижняя микрополосковая плата предназначена для соединения верхней платы с SMA разъемами через отрезки коаксиального кабеля или провода 11 через микрополосковые линии 10. В ОАГ на нижней микрополосковой плате располагается схема автогенератора. Для перестройки частоты в верхней части полости 1 располагается резьбовое отверстие 7 для установки настроечного винта. Снизу рама 4 прикрывается алюминиевой крышкой.

Размеры конструкции следующие: высота полости 8 мм; размеры верхней платы 28×28 мм; соединение «верхней» платы с «нижней» платой осуществлялось с по-

мощью отрезков медного провода D_w диаметром 0,51 мм; параметры подложки и размеры МПЛ аналогичны КС с цилиндрической полостью.

Известно, что перпендикулярное соединение коаксиальной и микрополосковой линии требует согласующего отрезка линии (отрезок согласующей линии $dl_{ш}$, присоединенный к месту стыка линий) [11]. Такое соединение длинных линий относительно узкополосное. Как показало моделирование, при длине $dl_{ш}$ равной 0,83 мм удается добиться модуля коэффициента отражения от стыка соединений линий менее –25 дБ в полосе частот от 9 до 11 ГГц.

Сравнительный анализ

результатов моделирования и эксперимента

В табл. 1 приведены результаты моделирования и экспериментальные результаты для конструкции КС с алюминиевой призматической полостью (рис. 6). ДР типа TE36-10BS устанавливался на плате, изготовленной из материала RO-4003C, с толщиной диэлектрика 0,508 мм и толщиной медного покрытия 17 мкм. Соединение «верхней» платы с «нижней» платой осуществлялось с помощью отрезков медного провода диаметром 0,51 мм. Расстояние dL между краем МПЛ и подставкой ДДР (см. рис. 1) выбиралось равным 4 мм. Настройка на резонансную частоту 10 ГГц осуществлялась с помощью настроечного алюминиевого винта размера М5. При моделировании был также рассмотрен способ возбуждения КС через дискретные порты со стороны верхней платы.

Таблица 1

Результаты моделирования и экспериментальные результаты
Modeling and experimental results

Условия опытов	Резонансная частота f_0 , ГГц	Коэффициент передачи $ S_{21}(f_0) $, дБ	Нагруженная добротность Q_n
Моделирование. Возбуждение КС со стороны нижней платы	10,00	–1,33	775
Моделирование. Возбуждение КС со стороны верхней платы	10,0062	–2,46	1570
Экспериментальные результаты	10,006	–4,96	690

Таблица 2

Результаты оценок уровней ФШ
Levels of phase noise of reference oscillators

Добротность Q_n	690	1300	2600	4000
$(K_{ш} = 2 \text{ дБ})$ Уровень фазового шума S_ϕ , дБ/Гц	-124,4	-130	-136	-139,7
$(K_{ш} = 10 \text{ дБ})$ Уровень фазового шума S_ϕ , дБ/Гц	-116,4	-122	-128	-131,7

Из табл. 1 видно, что при возбуждении КС внутри полости получают большие значения нагруженной добротности, чем в случае возбуждения со стороны «нижней» платы. Это связано с наличием паразитного излучения в месте соединения нижней и верхней платы, что также подтверждают и экспериментальные результаты. Уменьшение паразитного излучения возможно достичь при использовании для соединения «верхней» и «нижней» платы отрезков СВЧ-кабеля. Как показывает моделирование и эксперимент, при использовании кабеля EZ_86_CU_TP_M17 фирмы Huber-Suhner⁵ Q_n может достигать значений равных 1300.

Оценки уровня фазового шума ОАГ

Оценка уровня фазового шума S_ϕ ОАГ производилась по формуле Лисона [12]:

$$S_\phi(F) = \left(1 + \frac{1}{F^2} \cdot \left(\frac{f_0}{2 \cdot Q_n} \right)^2 \right) \times K_{ш} \cdot \frac{k \cdot T_0}{P_0} \cdot \left(1 + \frac{f_c}{F} \right), \quad (1)$$

где F – частота анализа; f_0 – рабочая частота АГ; $K_{ш}$ – коэффициент шума усилителя, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана; T_0 – температура окружающей среды в К°; P_0 – мощность на выходе АГ; f_c – частота перегиба, на которой мощность фликкерных шумов равна мощности равномерных шумов.

Полагалось, что в качестве усилителя

в ОАГ используются малощумящие СВЧ SiGe-транзисторы, обладающие низким коэффициентом шума и низким уровнем фликкерного шума⁶. Результаты оценок уровней ФШ ОАГ, работающих на частоте 10 ГГц с выходной мощностью 10 мВт, при использовании в усилителе транзисторов с $K_{ш}$ равным 2 дБ и f_c меньше 10 кГц для частот анализа F равных 10 кГц, приведены в табл. 2. Для сравнения также приведены результаты оценок уровня ФШ S_ϕ для $K_{ш}$ равного 10 дБ. Увеличенное значение $K_{ш}$ приведено для получения более реалистичных оценок S_ϕ . В АГ усилитель обычно работает в режиме ограничения, что обеспечивает работу АГ в режиме стационарных колебаний. Известно, что ФШ усилителя в режиме ограничения могут превышать уровень ФШ усилителя в линейном режиме на несколько дБ [13].

Из таблицы видно, что достаточно низкий уровень ФШ достигается уже для КС с нагруженной добротностью Q_n равной 690. Такая добротность достигнута в макете при использовании элементов связи в виде отрезков провода. При использовании в качестве элементов связи отрезков кабеля нагруженная добротность увеличивается практически в два раза, а уровень фазовых шумов уменьшается на 6 дБ. Повышение нагруженной добротности возможно также за счет увеличения расстояния dL до 6 мм. Это может привести к росту Q_n до 4000 и соответственно уменьшению уров-

⁵ Huber+Suhner. Products. Radio frequency. RF coaxial cables. Type EZ_86_CU_TP_M17_COIL // URL: <http://www.Hubersuhner.com/ProdDet/2476067> (Дата обращения: 19.04.2017).

⁶ BFP843 Robust Low Noise Broadband Pre-Matched Bipolar RF Transistor. Datasheet // URL: <http://www.infineon.com> (Дата обращения: 19.04.2017).

ня фазовых шумов до низких значений -130 дБ/Гц.

Таким образом, результаты исследования показали, что применение возбуждения КС, выполненной в виде призматической металлической полости с ДДР, через элементы связи, расположенные в основании призмы снизу микрополосковой платы с ДР, позволяет создать компактную колебательную систему. Такая КС может

найти применение в ОАГ сантиметрового диапазона, выполненных в гибридном исполнении. При размерах алюминиевой полости 28×8 мм и собственной добротности ДДР 10 000 удается достичь нагруженной добротности КС равной 4000. Оценки фазовых шумов ОАГ, выполненных на SiGe биполярных транзисторах и использующих такую КС, дают уровень ФШ -130 дБ/Гц на частотах анализа 10 кГц, который считается достаточно низким в настоящее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ченакин А.** Фазовые шумы в СВЧ-генераторах. Методы решения проблемы // *Электроника НТБ*. 2011. № 4. С. 52–61.
2. **Leeson D.B.** Oscillator Phase Noise: A 50-Year Review // *IEEE Trans. on UFFC*. 2016. Vol. 63. No. 8. Pp. 1208–1225.
3. **Геворкян В., Кочемасов В.** Объемные диэлектрические резонаторы – основные типы, характеристики, производители // *Электроника НТБ*. 2016. № 4. С. 62–76.
4. **Zhou L., Wu Z., Sallin M., Everard J.** Broad tuning ultra low phase noise dielectric resonator oscillators using SiGe amplifier and ceramic-based resonators // *IET Microw. Antennas Propag.* 2007. Vol. 1. No 5. Pp. 1064–1070.
5. **Grebennikov A.** RF and Microwave Transmitter Design. John Wiley & Sons, Inc., 2011. 816 p.
6. **Piekarski J., Czuba K.** The Method of Designing Ultra Low Phase Noise Dielectric Resonator Oscillators // 18th Internat. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. Proc. of the MIRON Conf. 2010. Vol. 1. Pp. 115–118.
7. **Son B.I., Jeong H.C., Yeom K.W.** Design of a Low Phase Noise Voltage Tuned DRO based on Improved Dielectric Resonator Coupling Structure // Proc. of APMC 2012, Kaohsiung, Taiwan, 2012. Pp. 1121–1123.
8. **Zhou L., Yin W.Y., Wang J., Wu L.S.** Dielectric Resonators with High Q-factor for Tunable Low Phase Noise Oscillators // *IEEE Trans. on CPMT*. 2013. Vol. 3. No. 6. Pp. 1008–1015.
9. **Yazdani M., Bates D., Murphy L.** The Design and Fabrication of a Compact Low Phase Noise Dielectric Cavity Resonator Oscillator // Proc. of the EuMA Conf. Rome, Italy, 2014. Pp. 719–722.
10. **Банков С.Е., Курушин А.А.** Расчет антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS Ansoft. М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. 256 с.
11. **Гасанов Л.Г., Липатов А.А., Марков В.В., Могильченко Н.А.** Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. М.: Радио и связь, 1988. 288 с.
12. **Huan X., Tan F., Wei W., Fu W.** A Revisit to Phase Noise Model of Leeson // Proc. of IEEE Frequency Control Symp. Geneva, 2007. Pp. 238–241.
13. **Jauregui R., Portilla J.** Optimum-setting and Calibration Procedures for Heterodyne Measurements of Amplitude and Phase Noise in High-frequency Amplifiers // *IEEE Trans. on MTT*. 2014. Vol. 62. No. 5. Pp. 1239–1248.

Статья поступила в редакцию 02.05.2017

REFERENCES

1. **Chenakin A.** Fazovyye shumy v SVCh-generatorakh. Metody resheniya problem [Microwaves Generators Phase Noise. Methods for Problems Solution]. *Elektronika NTB [Electronics: STB]*, 2011, No. 4, Pp. 52–61. (rus)
2. **Leeson D.B.** Oscillator Phase Noise: A 50-Year Review. *IEEE Trans. on UFFC*, 2016, Vol. 63, No. 8, Pp. 1208–1225.
3. **Gevorgyan V., Kochemasov V.** Obyemnyye dielektricheskiye rezonatory – osnovnyye tipy, kharakteristiki, proizvoditeli [Cavity dielectric resonators – basic types, characteristics, manufacturers. Part 1]. *Elektronika NTB [Electronics: STB]*, 2016, No. 4, Pp. 62–76. (rus)
4. **Zhou L., Wu Z., Sallin M., Everard J.** Broad tuning ultra low phase noise dielectric resonator oscillators using SiGe amplifier and ceramic-based resonators. *IET Microw. Antennas Propag.*, 2007, Vol. 1, No 5, Pp. 1064–1070.
5. **Grebennikov A.** RF and Microwave Transmitter Design. John Wiley & Sons, Inc., 2011, 816 p.
6. **Piekarski J., Czuba K.** The Method of Designing Ultra Low Phase Noise Dielectric Resonator Oscillators. *18th International Conference*

on *Microwaves, Radar and Wireless Communications. Proceedings of the MIRON Conf.*, 2010, Vol. 1, Pp. 115–118.

7. **Son B.I., Jeong H.C., Yeom K.W.** Design of a Low Phase Noise Voltage Tuned DRO based on Improved G Dielectric Resonator Coupling Structure. *Proceedings of APMC 2012*, Kaohsiung, Taiwan, Dec. 4-7, 2012, Pp. 1121–1123.

8. **Zhou L., Yin W.Y., Wang J., Wu L.S.** Dielectric Resonators with High Q-factor for Tunable Low Phase Noise Oscillators. *IEEE Trans. on CPMT*, 2013, Vol. 3, No. 6, Pp. 1008–1015.

9. **Yazdani M., Bates D., Murphy L.** The Design and Fabrication of a Compact Low Phase Noise Dielectric Cavity Resonator Oscillator. *Proc. of the EuMA Conf.*, Rome, Italy. 2014, Pp. 719–722.

10. **Bankov S.Ye., Kurushin A.A.** *Raschet antenn i*

SVCh struktur s pomoshchyu HFSS Ansoft [Calculation of antennas and microwave structures using HFSS Ansoft]. Moscow: ZAO «NPP «RODNIK» Publ., 2009, 256 p. (rus)

11. **Gasarov L.G., Lipatov A.A., Markov V.V., Mogilchenko N.A.** *Tverdotelnyye ustroystva SVCh v tekhnike svyazi* [Solid state microwave devices in communication technology]. Moscow: Radio i svyaz Publ, 1988, 288 p. (rus)

12. **Huan X., Tan F., Wei W., Fu W.** A Revisit to Phase Noise Model of Leeson. *Proceedings of IEEE Frequency Control Symposium*, Geneva, 29 May-1 Jun, 2007, Pp. 238–241.

13. **Jauregui R., Portilla J.** Optimum-setting and Calibration Procedures for Heterodyne Measurements of Amplitude and Phase Noise in High-frequency Amplifiers. *IEEE Trans. on MTT*, 2014, Vol. 62, No. 5, Pp. 1239–1248.

Received 02.05.2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ЕГОРОВ Егор Владимирович

EGOROV Egor V.

E-mail: egorkin.e@list.ru

МАЛЫШЕВ Виктор Михайлович

MALYSHEV Victor M.

E-mail: uhmal@mail.ru

DOI: 10.18721/JCSTCS.10205

УДК 621.396

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ ВТОРИЧНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ НА УДАЛЕННОМ ПУНКТЕ КОНТРОЛЯ

И.А. Цикин, Е.С. Поклонская

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен метод дистанционного контроля систем вторичной радиолокации (ВРЛ) на основе использования удаленного пункта контроля (УПК), на котором осуществляется анализ запросных и ответных сигналов с целью определения местоположения воздушных судов (ВС) и сравнения результатов с работой контролируемых систем. Выявлены источники ошибок, влияющих на точность работы системы дистанционного контроля (СДК), и найден допустимый уровень данных ошибок для обеспечения требуемой точности. Определена степень влияния каждого из рассмотренных видов ошибок на результат работы СДК. Проанализирована статистика случайной ошибки в определении местоположения ВС в СДК. Проведено сравнение точности работы СДК и контролируемых моностатической и бистатической систем ВРЛ для различных расположений ВС относительно УПК и радиолокационного запросчика. Предложены рекомендации по расположению УПК для обеспечения максимально возможной точности работы системы.

Ключевые слова: вторичная радиолокация; обработка сигналов; пункт контроля; радиолокация; определение местоположения.

Ссылка при цитировании: Цикин И.А., Поклонская Е.С. Обработка сигналов системы вторичной радиолокации на удаленном пункте контроля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 58–74. DOI: 10.18721/JCSTCS.10205

SECONDARY SURVEILLANCE RADAR SIGNALS PROCESSING AT THE REMOTE ANALYSIS STATION

I.A. Tsikin, E.S. Poklonskaya

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

The paper considers a method of remote control for Secondary Surveillance Radar (SSR) systems based on using a Remote Analysis Station (RAS), which analyzes the request and response signals for the purpose of locating aircraft and comparing the results with the performance of the controlled systems. We have identified the sources of the errors that affect the accuracy of the Remote Analysis Station (RAS) and established the level of these errors acceptable for ensuring the required accuracy. The degree of influence that each of the considered types of errors has on the performance of the RAS is determined. The statistics of aircraft position errors by the RAS is explored. The accuracy of the RAS and the controlled monostatic and bistatic SSR for different aircraft position depending on the SSR and receiver positions is compared. The comparison provides recommendations about the RAS location to provide maximum remote control system (RCS) accuracy.

Keywords: secondary surveillance radar; signal processing; remote analysis station; radiolocation; position determination.

Citation: Tsikin I.A., Poklonskaya E.S. Secondary surveillance radar signals processing at the remote analysis station. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 2, Pp. 58–74. DOI: 10.18721/JCSTCS.10205

Безопасность воздушного движения обеспечивается в значительной степени решением задачи определения местоположения воздушных объектов. Данную задачу решает ряд систем, в частности, системы первичной (ПРЛ) и вторичной (ВРЛ) радиолокации [1, 6], первые из которых являются активными системами с пассивным ответом, а вторые — активными системами с активным ответом. В ответном сигнале, излучаемом транспондером воздушного судна (ВС), содержится информация о номере ВС, его высоте, курсе скорости и т. д. [1], что является преимуществом систем ВРЛ в сравнении с ПРЛ.

Как в моностатических (МВРЛ), так и в бистатических (БВРЛ) системах ВРЛ [1, 4, 5] одним из видов ошибок, возможных в работе, являются «аномальные» внутрисистемные ошибки, проявляющиеся в погрешностях при измерении координат ВС, существенно превышающих таковые, связанные с воздействием аддитивных помех при обработке сигналов («нормальные» ошибки). Одним из методов контроля уровня аномальных ошибок является создание удаленных пунктов приема и обработки сигналов вторичной радиолокации, или удаленных пунктов контроля (УПК). На подобных пунктах в процессе обработки сигналов контролируемой системы ВРЛ, независимо от работы пункта приема (ПП) данной системы, осуществляется определение местоположения ВС [2, 3, 12]. При существенном расхождении значений координат ВС, полученных системой дистанционного контроля (СДК) и контролируемой системой ВРЛ, принимается решение о наличии аномальных внутрисистемных ошибок в последней.

Особенности дистанционного контроля систем МВРЛ и БВРЛ

В реальных условиях на УПК может отсутствовать априорная информация о местоположении и параметрах работы радара

(далее — радиолокационного запросчика, РЛЗ) контролируемой системы. Данная особенность СДК неизбежно оказывает влияние на точность ее работы. Вместе с тем точность определения местоположения ВС данной системой по уровню нормальных ошибок должна быть по крайней мере того же порядка, что и точность работы контролируемой системы ВРЛ. Сама по себе точность определения местоположения ВС в СДК, так же как и в контролируемой системе ВРЛ, описывается статистической случайной ошибкой $\delta R = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2}$, где δx и δy — соответственно ошибки измерения координат x и y проекции ВС на плоскость Земли.

Очевидно, что алгоритм определения местоположения ВС на УПК сводится к алгоритму определения местоположения ВС в эквивалентной системе БВРЛ, однако при условии предварительной оценки местоположения и параметров работы РЛЗ. При этом для вычисления координат ВС необходимо знать значения разности хода $L = R_1 + R_2 - b$ и угла φ (рис. 1), получаемых в результате измерения моментов поступления сигналов РЛЗ и транспондера ВС на вход УПК [4]. Местоположение ВС

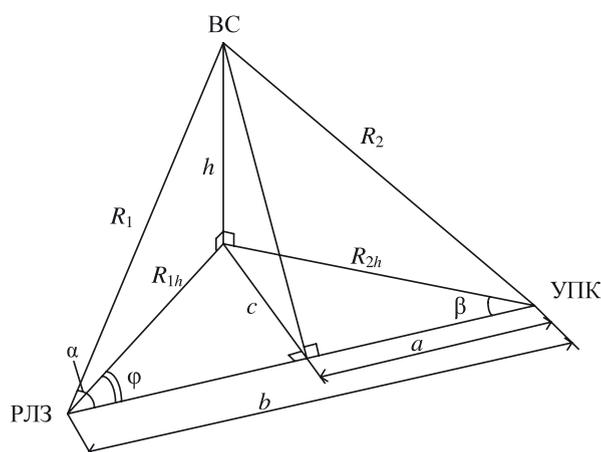


Рис. 1. Схема удаленного контроля системы ВРЛ
Fig. 1. The SSR distance control scheme

вычисляется из известных координат РЛЗ и УПК, а также расстояний R_1 и R_2 , определяемых из измеренных значений L и φ .

Уровень указанных выше ошибок измерения координат ВС в СДК существенно зависит не только от величины ошибок в оценке моментов поступления сигналов на УПК, но также, в общем случае, и от расположения ВС относительно УПК и РЛЗ [1, 4].

Точность работы системы МВРЛ зависит от точности определения моментов поступления сигнала РЛЗ на вход приемника ВС и сигнала транспондера ВС на вход приемного устройства системы МВРЛ. При этом в соответствующей СДК, кроме того, необходимо определять также и момент поступления запросного сигнала РЛЗ, что вносит вклад в итоговую ошибку δR . Помимо этого, на различие в точности работы СДК и контролируемой системы МВРЛ влияет то, что вследствие территориального разнесения приемного устройства и РЛЗ точность работы СДК хотя и остается приблизительно той же при значительном удалении проекции обнаруживаемого ВС на Землю от отрезка, соединяющего УПК и РЛЗ (называемого базой системы), но становится ниже при приближении проекции к данному отрезку. При этом, при расположении проекции обнаруживаемого ВС вблизи линии базы, когда $c \ll b$ (рис. 1), с уменьшением высоты его полета точность работы системы снижается, что обусловлено уменьшением значений величин φ и L и, соответственно, увеличением относительных ошибок $\delta\varphi/\varphi$ и $\delta L/L$ [8].

В связи с тем, что в СДК пункт контроля находится на удалении от РЛЗ, а в системе МВРЛ пункт приема совмещен с РЛЗ, геометрия контролирующей и контролируемой систем подразумевает, что точность СДК окажется не выше точности системы МВРЛ даже в условиях, когда параметры РЛЗ являются априорно известными в СДК. Очевидно, априорная неопределенность в отношении параметров работы и местоположения РЛЗ лишь снизит точность работы системы контроля.

При контроле бистатических систем ВРЛ точность СДК в общем случае может

оказаться как выше, так и ниже точности контролируемой системы в зависимости от расположения обнаруживаемого ВС относительно УПК, ПП и РЛЗ. Например, при нахождении проекции ВС на Землю на линии базы системы БВРЛ, но при значительном удалении от линии базы СДК, точность работы СДК может оказаться выше точности работы контролируемой системы. Однако при наличии априорной неопределенности относительно местоположения и параметров РЛЗ точность работы СДК неизбежно снизится, и может оказаться так, что она ни при каких условиях не окажется выше точности работы контролируемой системы.

Таким образом, представляет интерес сравнение точности работы СДК и контролируемых систем МВРЛ и БВРЛ в условиях наличия априорной неопределенности относительно местоположения и параметров РЛЗ контролируемой системы, а также выявление условий, при которых точность работы СДК оказывается по крайней мере того же порядка, что и точность работы контролируемых систем МВРЛ и БВРЛ.

Алгоритм определения местоположения ВС в СДК

Рассмотрим алгоритм определения местоположения ВС в СДК. Заметим, что данная система может быть отнесена к классу бистатических систем, в связи с чем рассматриваемый алгоритм сводится к алгоритму определения местоположения ВС в системе БВРЛ, но с предварительной оценкой местоположения и параметров работы РЛЗ. Основной процедурой обработки сигналов, предусматриваемой данным алгоритмом, является статистическая оценка моментов поступления запросных и ответных сигналов на вход УПК. На рис. 2 на верхней шкале времени отмечены моменты излучения запросных сигналов t_{zi} РЛЗ и моменты излучения ответных сигналов ВС t_{oi} ($i \geq K$). На нижней шкале времени отмечены моменты поступления запросных сигналов t_{zni} и ответных сигналов t_{oni} ($i \geq K$) на вход УПК.

Интервал следования запросных сигналов в системах ВРЛ выбирается таким об-

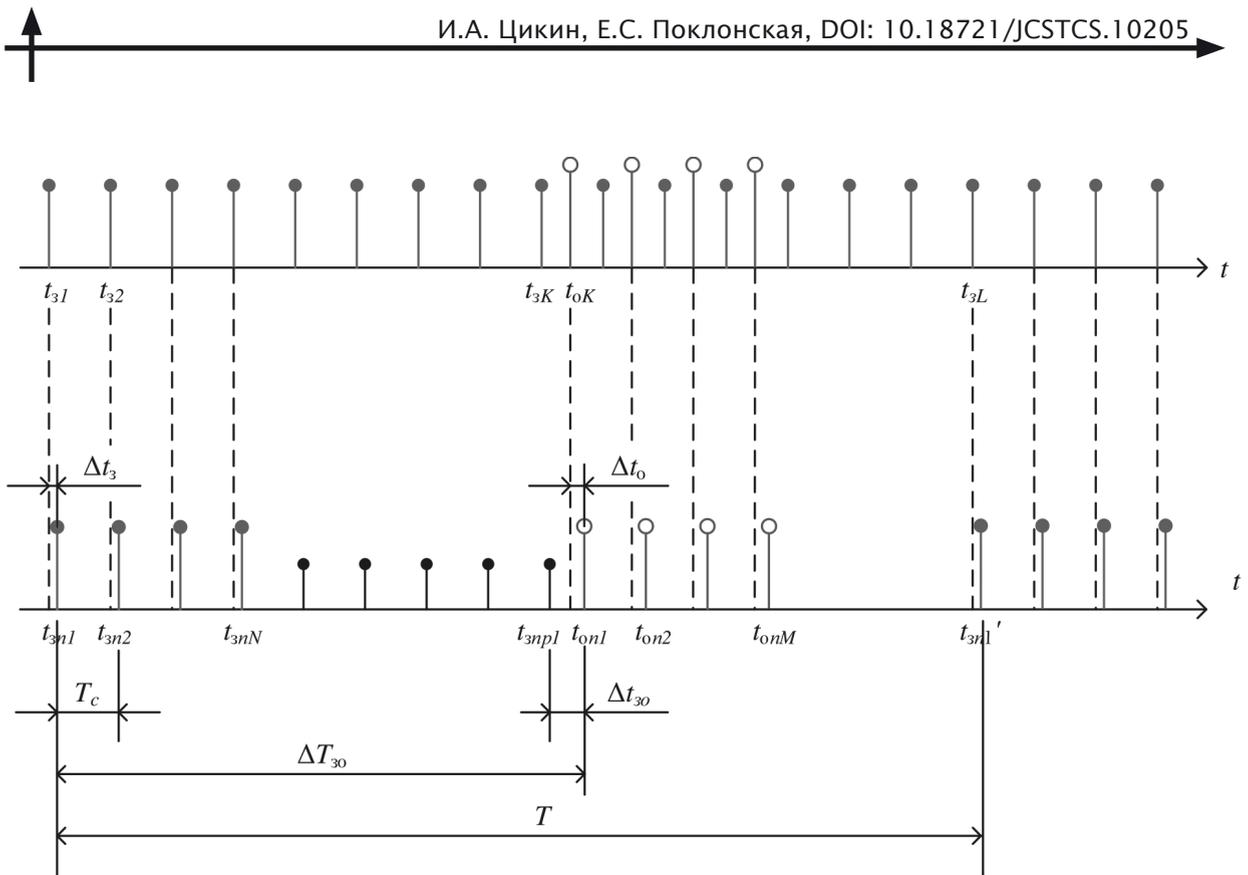


Рис. 2. Моменты излучения (верхняя шкала времени) и приема на УПК (нижняя шкала времени) запросных и ответных сигналов РЛЗ и ВС контролируемой системы ВРЛ

Fig. 2. SSR request and aircraft answer signals time moments of emission (upper time scale) and receiving at RAS (lower time scale)

разом, чтобы он превышал удвоенное время распространения сигнала от РЛЗ до ВС, расположенного на границе зоны видимости РЛЗ. Этим гарантируется, что ответный сигнал от ВС, излученный в момент времени t_{0K} , является ответом на ближайший по времени запросный сигнал, излученный в момент времени t_{3K} .

Рассмотрим, прежде всего, случай, когда период T вращения антенны РЛЗ, период следования запросных сигналов T_c и местоположение РЛЗ являются точно известными. Тогда можно предсказать моменты времени t_{3np_i} (короткие отрезки на нижней оси времени на рис. 2), в которые были бы получены очередные запросные сигналы, излучаемые РЛЗ, если бы антенна РЛЗ была всенаправленной, вплоть до моментов времени, в которые поступят ответные сигналы от ВС. В результате можно оценить разницу во времени $\Delta t_{30} = t_{on_i} - t_{3np_i}$ между принятым i -м ответным сигналом t_{on_i} и ближайшим к нему предсказанным

запросным сигналом t_{3np_i} . Тогда величина L может быть вычислена по формуле:

$$L = c \cdot (\Delta t_{30} - t_c). \quad (1)$$

Здесь t_c — время обработки запросного сигнала РЛЗ и формирования ответного сигнала ВС, c — скорость света.

Угол φ может быть вычислен по формуле:

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta T_{30}}{T} [\text{рад}]. \quad (2)$$

Таким образом, в СДК ошибки в определении параметров L и φ зависят от ошибок в определении параметров Δt_{30} , ΔT_{30} .

В общем случае, когда значения параметров T и T_c неизвестны, они определяются в процессе обработки запросных и ответных сигналов на основании измеренных моментов их поступления на вход УПК. Вычисление параметра T_c происходит путем усреднения значений предыдущих оцененных интервалов $t_{3ni} - t_{3n(i-1)}$ между мо-

ментами поступления соседних запросных сигналов на вход УПК, а вычисление параметра T — путем усреднения значений интервалов $t_{zn} - t_{zn}'$ между моментами поступления определенных (на рис. 2 — первых в пачке) запросных сигналов. При этом, очевидно, ошибки в определении данных моментов неизбежно повлияют на точность определения местоположения и параметров работы РЛЗ. Так как, согласно формулам (1) и (2), значения разности хода L и угла φ зависят, в частности, от значений T и T_c , неточность в определении моментов поступления сигналов на вход УПК в этом случае внесет дополнительную ошибку в вычисляемые значения параметров L и φ .

Заметим, что сама по себе природа возникновения ошибок при определении L связана с тем, что в результате неверного измерения значения T_c предсказанный момент t_{znpi} излучения запросного сигнала (см. рис. 2) не будет совпадать с моментом времени, в который был бы получен соответствующий запросный сигнал, излучаемый РЛЗ, если бы антенна РЛЗ была всенаправленной.

Кроме ошибок в измерении параметров работы РЛЗ, на точность вычисления L и φ оказывают влияние также «системные» ошибки, связанные с нестабильностями скорости вращения антенны и частоты работы тактового генератора РЛЗ. При этом если уровень ошибок измерения параметров РЛЗ при отсутствии нестабильностей его работы может быть снижен путем увеличения числа измерений, влияние рассмотренных системных ошибок оказывается неустранимым для СДК.

К системным ошибкам также относятся ошибка в определении высоты полета ВС и ошибка, вызванная дискретностью моментов излучения запросных и ответных сигналов. Значение высоты содержится в ответном сигнале, но лишь в указании эшелона высоты, типичная глубина которого составляет 375 м [9]. Таким образом, максимально возможное значение такой ошибки составляет примерно 187,5 м. Дискретный характер следования запросных и ответных сигналов контролируемой системы ВРЛ приводит к ошибочному определению величины ΔT_{30} и, как следствие, к ошибке в

определении угла φ из (2). Последняя, очевидно, не превышает величины $2\pi T_c/T$.

Как отмечалось выше, для определения координат $\{x, y\}$ проекции ВС на плоскость Земли необходимо вычислить значения расстояний R_1 и R_2 (см. рис. 1). Действительно, имеем

$$\begin{cases} (x - x_{\text{РЛЗ}})^2 + (y - y_{\text{РЛЗ}})^2 + (h - z_{\text{РЛЗ}})^2 = R_1^2 \\ (x - x_{\text{УПК}})^2 + (y - y_{\text{УПК}})^2 + (h - z_{\text{УПК}})^2 = R_2^2 \end{cases} \quad (3)$$

где $\{x_{\text{РЛЗ}}, y_{\text{РЛЗ}}, z_{\text{РЛЗ}}\}$ и $\{x_{\text{УПК}}, y_{\text{УПК}}, z_{\text{УПК}}\}$ — пространственные координаты соответственно РЛЗ и УПК.

В свою очередь, значения R_1 и R_2 определяются из следующей системы уравнений на основании параметров L и φ , вычисленных из измеренных моментов поступления запросных и ответных сигналов по формулам (1) и (2):

$$\begin{cases} R_1^2 = h^2 + R_{1h}^2 \\ R_2^2 = h^2 + R_{2h}^2 \\ L = R_1 + R_2 - b \\ R_{2h}^2 = R_{1h}^2 + b - 2R_{1h}b \cos \varphi \end{cases} \quad (4)$$

Здесь известными, в результате проведенных измерений, параметрами являются L, b, h, φ , а неизвестными, соответственно, параметры R_1, R_2, R_{1h}, R_{2h} . Таким образом, в результате решения данной системы уравнений относительно R_1 получается следующее квадратное уравнение:

$$\begin{aligned} R_1^2 [4b^2 \cos^2 \varphi - 4(L + b)^2] + \\ + 4R_1 [(L + b)(L^2 + 2Lb)] - \\ - [4b^2 \cos^2 \varphi h^2 - (L^2 + 2bL)^2] = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

При выполнении условия $|\alpha - \varphi| \ll \alpha, \varphi$ (см. рис. 1), что эквивалентно условию $c \gg h$, вместо квадратного уравнения (5) для определения значения величины R_1 с некоторыми допущениями можно использовать следующую формулу [4]:

$$\begin{aligned} R_1' \approx R_{1h} &= \frac{L_h^2 + 2L_h b}{2L_h + 2b - 2b \cos \varphi} \approx \\ &\approx \frac{L^2 + 2Lb}{2L + 2b - 2b \cos \varphi}. \end{aligned} \quad (6)$$

Однако в общем случае такое допущение приводит к ошибкам, существенным при

некоторых положениях ВС относительно УПК и РЛЗ. В подобных случаях величина R_1 может быть найдена только из квадратного уравнения (5), причем выбор требуемого решения возможен путем сравнения результатов решения уравнений (5) и (6). Для большинства возможных положений ВС относительно УПК и РЛЗ истинным значением R_1 окажется то, для которого величина $|R_1 - R_1'|$ окажется меньше.

Из третьего уравнения системы (4) при известных параметрах L и b и найденном параметре R_1 можно получить значение R_2 , откуда в дальнейшем при известной высоте h воздушного судна определяются его координаты.

Модели обработки сигналов в СДК

С целью анализа точности работы СДК и сравнения ее с точностью контролируемой системы ВРЛ было проведено моделирование работы данных систем в среде Matlab. При этом возможны по меньшей мере два принципиально различных способа построения модели. При первом способе прежде всего находятся распределения статистических оценок моментов поступления запросных и ответных сигналов на вход УПК. Далее производится генерирование случайных величин, имеющих указанные выше распределения, и передача их на вход следующего блока модели, в котором осуществляется нахождение распределений статистических оценок значений параметров L и φ . Это позволяет произвести генерирование таких значений и передачу их, в свою очередь, на блок нахождения распределений статистических оценок значений параметров R_1 и R_2 . Полученные распределения, аналогично предыдущим этапам моделирования, используются для получения распределений оценок значений координат ВС, что, в конечном счете, позволяет получить распределение итоговой ошибки δR .

В отличие от рассмотренного, при втором способе полученные оценки моментов поступления запросных и ответных сигналов на вход УПК не используются для построения функций распределения соответствующих случайных величин, а непосредственно поступают на блок вычисле-

ния оценок значений параметров L и φ , а далее и параметров R_1 и R_2 , позволяющих вычислить оценки значений координат ВС, а следовательно, и величину ошибки δR . Далее, методом статистических испытаний находятся параметры распределения ошибки δR , а при необходимости, и само это распределение.

Недостатком первого способа является трудоемкость построения модели, вызванная необходимостью поиска распределения вероятностей для каждой рассматриваемой случайной величины, что подразумевает построение гистограмм и их соответствующую аппроксимацию. Второй способ лишен данного недостатка, но, в отличие от первого, в общем случае требует больших вычислительных затрат. Это вызвано тем, что для получения статистики ошибки δR в различных условиях при первом способе построения модели достаточно, задав требуемые параметры распределений, запустить только необходимые блоки модели, в то время как при втором способе при каждом испытании используются все блоки модели, представляющей собой в этом случае по сути имитационную модель СДК.

Компромиссным решением является комбинированный способ построения модели, при котором находятся распределения не всех случайных величин, а только части из них. Затем найденные распределения используются при работе следующих блоков модели, в которых вычисление оценок значений прочих параметров производится в соответствии со вторым способом. Далее будет использован именно такой комбинированный способ, в котором изначально находятся распределения случайных моментов поступления запросных и ответных сигналов, а затем с помощью найденных распределений осуществляется оценка значений параметров L и φ , R_1 и R_2 и параметры распределения итоговой ошибки δR . Схема алгоритма работы модели изображена на рис. 3.

Исследуемые области значений параметров распределений моделируемых случайных величин задавались следующим образом. Поскольку в системах ВРЛ ошибки могут достигать нескольких сотен

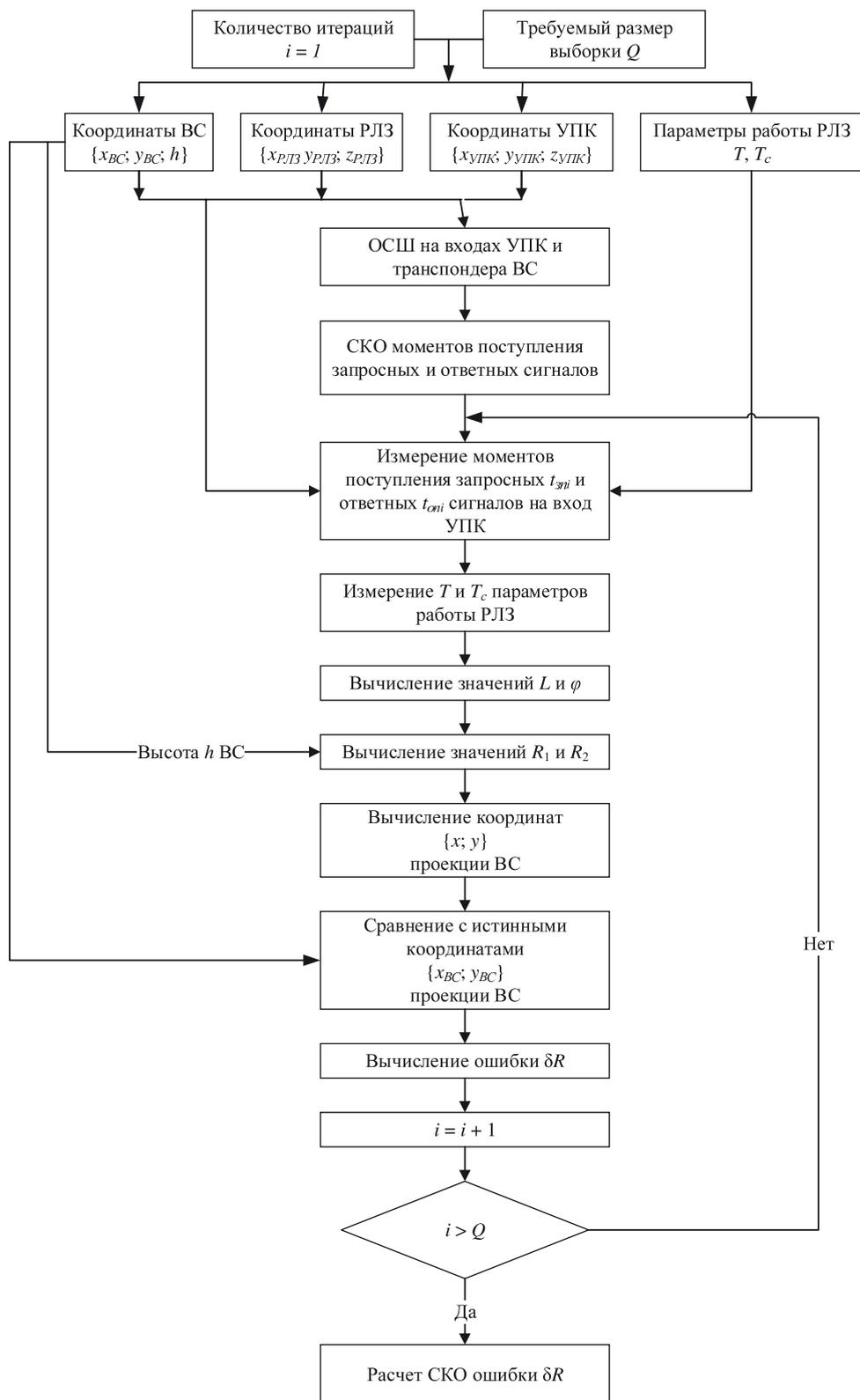


Рис. 3. Схема алгоритма определения параметров распределения ошибки δR
Fig. 3. The algorithm for determining the distribution parameters of the error

метров [10], а ошибки в СДК должны быть того же порядка, что и в контролируемой системе, допустимым среднеквадратичным отклонением (СКО) ошибки в определении местоположения ВС на УПК положим величину, примерно равную 100 м. При этом, поскольку ошибки δR для большинства возможных положений ВС имеют тот же порядок, что и ошибки δL в измерении значения параметра L , будем полагать значение величины $\sigma_{\delta L}$ СКО ошибки δL в определении разности хода также равным примерно 100 м.

Ошибки δt_3 и δt_0 в определении соответственно моментов поступления запросных и ответных сигналов приводят к ошибке в определении значения разности хода $\delta L = (\delta \Delta t_{30})C = (\delta t_0 + \delta t_3 + K_{Tc} \delta T_{c_{\text{выч}}})C$, где $\delta T_{c_{\text{выч}}}$ – ошибка в вычислении значения T_c , вызванная наличием ошибок δt_3 , K_{Tc} – количество предсказанных запросных сигналов. При этом значение T_c вычисляется путем усреднения K_{Tc} результатов измерений величины T_c , равной разнице между моментами t_{3ni} и $t_{3n(i+1)}$ поступления двух соседних запросных сигналов, так что

$\delta T_{c_{\text{выч}}} = \frac{1}{K_{Tc}} \sum_{i=1}^{K_{Tc}} \delta t_{3i}$, где δt_{3i} – ошибка в определении момента поступления i -го запросного сигнала. В связи с этим дисперсия $\sigma_{\delta L}^2$ величины δL определяется суммой дисперсий $\left(\frac{K_{Tc}^2}{K_{Tc}} + 1\right) \sigma_{\delta t_3}^2$ и $\sigma_{\delta t_0}^2$. Величина K_{Tc} равна произведению количества N оборотов антенны, за которые определяются параметры работы РЛЗ, на количество M полученных на УПК запросных сигналов РЛЗ за время, в течение которого антенна РЛЗ была направлена на УПК. Примем $M \approx N \approx 10$. Тогда, полагая $\sigma_{\delta L} \approx 100$ м и $K_{Tc} \approx 10^3$, в условиях $\sigma_{\delta t_3} \approx \sigma_{\delta t_0}$ получаем $\sigma_{\delta t_0} \approx \sigma_{\delta t_3} \approx 10^{-8}$ с.

Полученные значения СКО моментов поступления запросных и ответных сигналов на вход УПК будут использованы ниже при моделировании работы систем ВРЛ и дистанционного контроля в условиях воздействия аддитивного белого гауссова шума.

Учет влияния нестабильностей параметров РЛЗ

Нестабильность работы тактового генератора РЛЗ может иметь как долговременный (когда значения T_c в пределах нескольких оборотов антенны можно считать постоянными), так и кратковременный случайный характер. В последнем случае разности между значениями соседних интервалов T_c (рис. 2) оказываются различными и случайными. При долговременной нестабильности существует возможность слежения за медленно изменяющимися значениями T_c , так что больший вклад в ошибку в определении местоположения ВС из упомянутых «системных» нестабильностей вносят случайные кратковременные нестабильности. Ошибки, связанные с такого рода нестабильностью работы РЛЗ, приводят к росту погрешности δt_{3npi} в предсказании i -го момента излучения запросных сигналов, вносящей, в свою очередь, вклад в результирующую ошибку $\delta \Delta t_{30}$ в вычислении разностей во времени между ответными сигналами и ближайшими к ним предсказанными сигналами (короткие отрезки на рис. 2). Данные ошибки приводят к погрешности в измерении разности хода $\delta L = C \delta \Delta t_{30}$.

Прежде всего оценим уровень величины $\sigma_{\delta T_c}$ СКО ошибки δT_c в определении момента поступления запросного сигнала РЛЗ на УПК, непосредственно предшествующего моменту поступления ответного сигнала от ВС, в условиях отсутствия влияния других видов погрешностей. В данном случае $\delta \Delta t_{30} = \sum_{i=1}^K \delta T_{ci}$, где δT_{ci} – ошибка в определении момента поступления запросного сигнала РЛЗ на i -м цикле предсказания значения этого момента. Значение величины K не превышает количество излучаемых запросных сигналов за период вращения антенны, равное T/T_c . Таким образом, $\sigma_{\delta T_{ci}} \approx \sigma_{\Delta t_{30}} \sqrt{T_c/T}$. Так, в типичных случаях $T_c/T = 10^{-3}$ и $T_c/T = 10^{-4}$, а также по-прежнему ориентируясь на уровень ошибки $\sigma_{\delta L} \approx 100$ м, имеем, соответственно, $\sigma_{\delta T_{ci}} \approx 10^{-8}$ с и $\sigma_{\delta T_{ci}} \approx 10^{-9}$ с. Подобные

значения $\sigma_{\delta T_{ci}}$, как правило, достигаются в аэродромных системах БВРЛ.

В общем же случае, разумеется, на уровень суммарной ошибки $\delta \Delta t_{30}$ влияют также и рассмотренные выше ошибки δt_3 и δt_0 в определении моментов поступления запросных и ответных сигналов на вход УПК, обусловленные влиянием аддитивного шума на входах устройств обработки сигналов.

Нестабильность δT периода вращения антенны РЛЗ приводит к ошибке $\delta \varphi$ в определении угла φ , равной $\delta \varphi = 2\pi \Delta T_{30} / \delta T$. Тогда ошибка в определении координат $\{x; y\}$ ВС в условиях отсутствия другого вида погрешностей измерений будет, очевидно, равна $\delta R = R_{1h} \sqrt{2(1 - \cos \delta \varphi)}$.

Типичными значениями величины R_{1h} являются десятки километров. Таким образом, для обеспечения точности в определении местоположения ВС $\delta R \approx 100$ м можно полагать допустимой ошибку $\delta \varphi \approx \arccos(1 - 10^{-4}/2) = 0,01$ рад.

При моделировании нестабильность δv скорости вращения антенны РЛЗ, соответствующая величине $\delta T = 1/\delta v$ нестабильности периода ее вращения, учитывается в виде случайной ошибки δv_i , вносимой при каждом i -м моменте излучения очередного запросного сигнала. Между моментами излучения соседних запросных сигналов антенна РЛЗ поворачивается на угол $\varphi_i = 2\pi T_c v_i$, где $v_i = \delta v_i + 1/T$ — скорость вращения антенны РЛЗ в рассматриваемый отрезок времени между излучениями i -го и $(i+1)$ -го запросных сигналов.

Полагая $\delta \varphi = \sum_{i=1}^K \delta \varphi_i$, СКО $\sigma_{\delta \varphi_i}$ ошибки $\delta \varphi_i$ будет равно $\sigma_{\delta \varphi_i} = \sigma_{\delta v_i} / \sqrt{K}$ и для $K \approx 10^3$ оказывается порядка 10^{-4} рад. Тогда СКО $\sigma_{\delta v_i} = \sigma_{\delta \varphi_i} / (2\pi T_c)$ нестабильности δv_i скорости вращения антенны РЛЗ в типичном случае $T_c \approx 1$ мс составит величину порядка 0,01 об/с. Данное значение является типичным для аэродромных систем ВРЛ [18].

Полученные значения СКО $\sigma_{\delta T_{ci}}$ и $\sigma_{\delta v_i}$ будут использованы ниже при моделировании систем ВРЛ и дистанционного контроля при наличии нестабильностей скорости вращения антенны и частоты тактового генератора РЛЗ.

Результаты моделирования

Прежде всего, оценим влияние каждого из рассматриваемых видов ошибок на точность работы СДК.

В таблице в качестве примера представлены значения СКО $\sigma_{\delta R}$ ошибки δR и коэффициенты корреляции r между величинами δx и δy при анализе влияния различных (изолированных от других) типов ошибок для случая $R_{2h} = 50$ км, $b = 30$ км, $h = 10$ км (рис. 2). При этом, согласно проведенному моделированию, оцененное ранее значение $\sigma_{\delta t_3} \approx 10^{-8}$ с соответствует отношению сигнал/шум на выходе устройства обработки, примерно равному 10 дБ.

Как следует из результатов, приведенных в таблице, при наличии лишь ошибки в определении высоты полета ВС, СКО $\sigma_{\delta R}$ ошибки в определении его местоположения составляет порядка 10 м. Аналогично, при наличии только ошибки, вызванной дискретным характером излучения запросных и ответных сигналов, $\sigma_{\delta R}$ оказывается также порядка 10 м. Данные ошибки оказывают существенно меньшее влияние на точность работы СДК по сравнению с прочими рассмотренными видами ошибок, поскольку СКО $\sigma_{\delta R}$ с учетом всех видов ошибок достигает величины порядка 100 м. При этом наибольший вклад в равной степени вносят ошибки, связанные с аддитивным шумом, и ошибки, вызванные нестабильностью периода следования запросных сообщений.

Также из таблицы видно, что ошибки в определении координат $\{x; y\}$ коррелированы, и коэффициент корреляции уменьшается лишь при некоторых взаимных положениях РЛЗ, ВС и УПК, причем, в рассматриваемых условиях, только в том случае, когда единственной вносимой ошибкой является ошибка в скорости вращения антенны РЛЗ либо системные ошибки, вызванные эшелонированием высоты или дискретностью запросных и ответных сигналов. Это наглядно видно из рис. 4, на котором в качестве примера представлены истинные и измеренные положения ВС при наличии только ошибки, связанной с эшелонированием (рис. 4 а), при на-

Зависимость СКО δR и коэффициента корреляции r между δx и δy от типа ошибкиThe dependence of standard deviation δR and correlation coefficient r between δx and δy from the error type

Тип ошибки		$\varphi = 70^\circ$		$\varphi = 120^\circ$	
		$\sigma_{\delta R}, \text{М}$	r	$\sigma_{\delta R}, \text{М}$	r
Системные ошибки	Ошибки, связанные с эшелонированием высоты ВС	3,57	-0,03	8,58	-1,00
	Ошибки, вызванные дискретностью излучения запросных и ответных сигналов	3,17	-0,03	10,92	-1,00
	Ошибки, вызванные нестабильностью периода следования запросных сигналов ($\sigma_{\delta T_{ci}} = 5 \cdot 10^{-9}$)	110,37	-0,99	181,09	0,99
	Ошибки, вызванные нестабильностью скорости вращения антенны РЛЗ ($\sigma_{\delta \omega_i} = 10^{-2}$)	79,27	-0,09	79,93	0,99
Ошибки, связанные с влиянием аддитивного шума ($\sigma_{\delta t_0} \approx \sigma_{\delta t_3} \approx 10^{-8}$ с)		160,06	-0,99	256,28	0,99

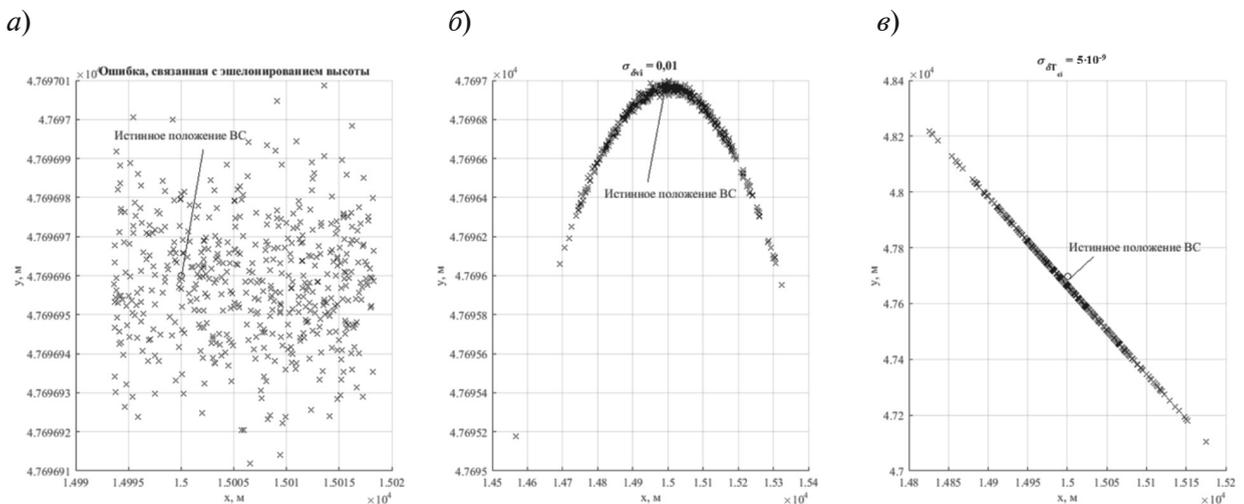


Рис. 4. Значения координат $\{x; y\}$ при наличии только ошибки, связанной с эшелонированием (а), только нестабильности в скорости вращения антенны РЛЗ $\sigma_{\delta \omega_i} = 10^{-3}$ (б) и только нестабильности в периоде следования запросных сигналов $\sigma_{\delta T_{ci}} = 5 \cdot 10^{-9}$ (в) для $\varphi = 70^\circ$

Fig. 4. The coordinate values $\{x; y\}$ in cases of the presence of the error caused by flight level only (a), the SSR antenna instability $\sigma_{\delta \omega_i} = 10^{-3}$ presence only (b) and the request signals pulse repetition interval instability $\sigma_{\delta T_{ci}} = 5 \cdot 10^{-9}$ presence only (c) when $\varphi = 70^\circ$

личии только нестабильности в скорости вращения антенны РЛЗ (рис. 4 б) и при наличии только нестабильности в периоде следования запросных сигналов (рис. 4 в) в частном случае $\varphi = 70^\circ$. Существенно нелинейный характер зависимости ошибки по x -координате от ошибки по y -координате (рис. 4 б) объясняет близкое к нулю значение коэффициента корреляции.

Оценим совместное влияние всех видов рассмотренных ошибок на величину $\sigma_{\delta R}$ СКО ошибки в определении местоположения ВС в представляющем практический интерес случае $L = 100$ км, $b = 30$ км. В качестве примера рассмотрим случаи $\varphi = 72^\circ$ и $\varphi = 120^\circ$. Для сравнения также рассмотрим отдельно случай $L = 50$, $\varphi = 72^\circ$ при прочих равных условиях. Гистограммы, полученные в ходе 5000 статистических испытаний, для каждого из рассмотренных случаев представлены на рис. 5.

Вид функции, аппроксимирующей распределение случайной величины δR , зависит от распределений величин δx и δy . Как показывает моделирование, коэффициент корреляции данных величин в общем случае отличен от нуля, а их распределения в рассматриваемых условиях аппроксимируются нормальными распределениями с нулевыми математическими ожиданиями, но, в общем случае, различными дисперсиями. Тогда распределение случайной величины δR может быть аппроксимировано четырехпараметрическим распределением при равенстве нулю математических ожиданий составляющих (распределением Хойта [11]):

$$W(r) = \frac{r}{\sigma_x \sigma_y} \exp \left[-\frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \right] \times I_0 \left[\frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Кроме того, согласно [7], четырехпараметрическое распределение может также с некоторой погрешностью быть аппроксимировано распределением Накагами. Аппроксимации распределениями Хойта и Накагами для различных случаев представлены на рис. 5. При этом в ходе моделирования были получены значения коэффици-

ентов корреляции r , равные $-0,6$ (рис. 4 а), $0,88$ (рис. 4 б) и $-0,95$ (рис. 4 в). Из рисунков видно, что, действительно, распределение Накагами несколько хуже описывает распределение величины δR по сравнению с распределением Хойта. Однако распределение Хойта тем более удовлетворительно аппроксимирует гистограммы распределений δR , чем меньше по модулю значение коэффициента корреляции r . Тем не менее, как показал анализ, при $|r| \approx 1$ рассмотренные аппроксимации распределениями как Хойта, так и Накагами в области малых значений δR имеют существенные погрешности. В то же время, аналитические оценки СКО величины δR , полученные с помощью данных распределений, несущественно отличаются от СКО, полученных непосредственно на основе анализа гистограмм распределения величины δR .

Ошибки в определении координат в любой бистатической системе неразрывно связаны с геометрией данной системы. Так как СДК может быть отнесена к разряду бистатических систем, необходимо рассмотреть ошибки в системе контроля для различных положений ВС относительно УПК и РЛЗ, определяющих значения параметров L и φ . Однако рост значения L при фиксированном значении угла φ приводит к увеличению расстояния от ВС до УПК и РЛЗ и соответственно, ослаблению мощности ответного сигнала обратно пропорционально квадрату данного расстояния, что, в свою очередь, вызывает предсказуемое снижение точности работы СДК. Поэтому более интересным является рассмотрение зависимости величины ошибки δR от угла φ . В связи с этим в модели рассматриваются положения ВС на эллипсе с фокусами в местах расположения РЛЗ и УПК, что обеспечивает фиксированную разность хода L при различных значениях угла γ и соответственно, φ (рис. 6).

Рассмотрим различие в точности работы СДК и контролируемых систем ВРЛ (БВРЛ и МВРЛ) для различных значений угла γ . Как отмечалось выше, на точность работы системы МВРЛ влияют только ошибки в определении моментов поступления запросного сигнала на вход ВС и

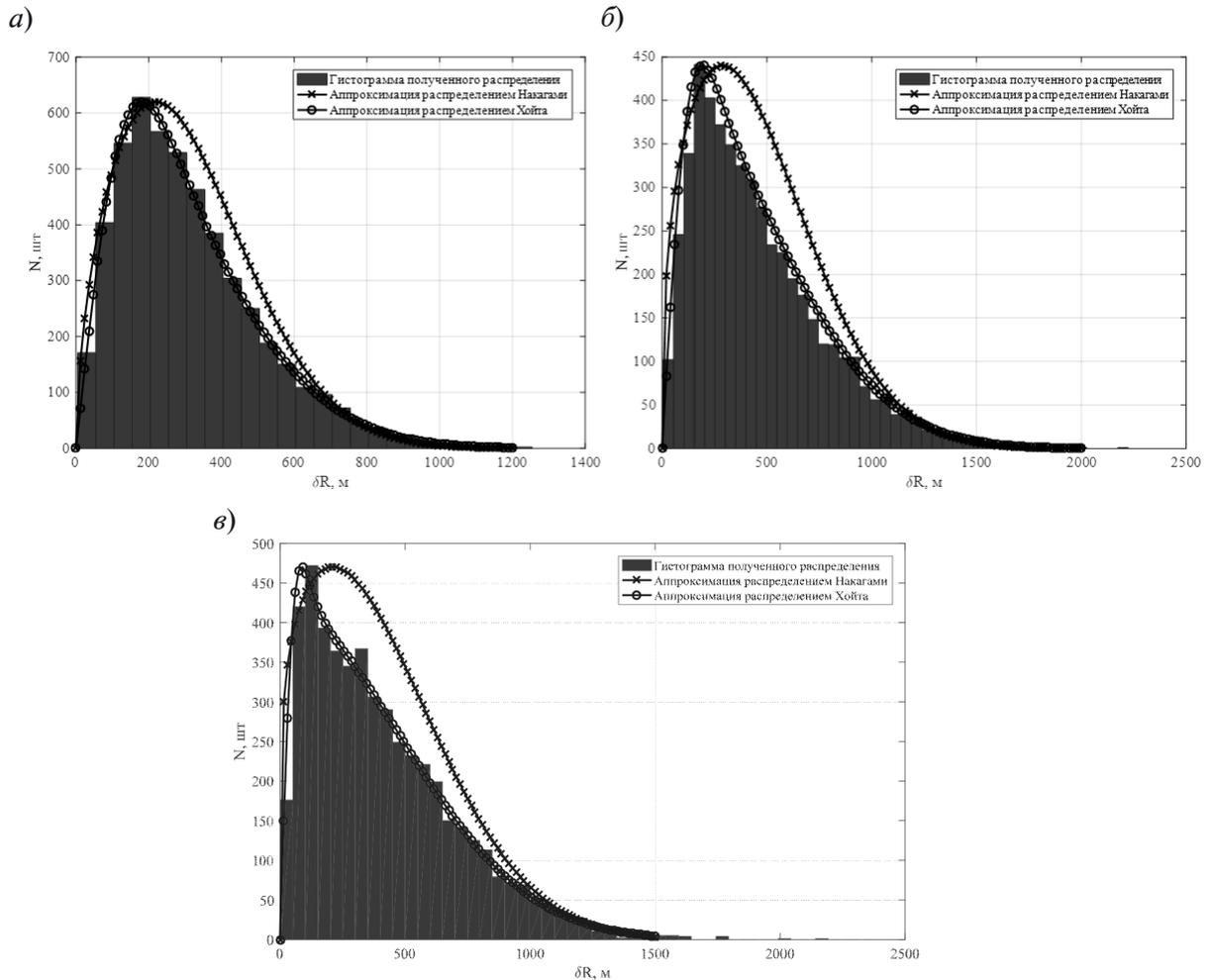


Рис. 5. Гистограммы распределения случайной величины δR и его аппроксимации распределениями Накагами и Хойта для случаев $L = 100$ км, $b = 30$ км, $\varphi = 72^\circ$ (а); $L = 100$ км, $b = 300$ км, $\varphi = 120^\circ$ (б); $L = 50$ км, $b = 30$ км, $\varphi = 72^\circ$ (в)

Fig. 5. The histograms of random variable δR distribution and its approximations by Nakagami and Hoyt distributions in cases of $L = 100$ km, $b = 30$ km, $\varphi = 72^\circ$ (a); $L = 100$ km, $b = 300$ km, $\varphi = 120^\circ$ (б); $L = 50$ km, $b = 30$ km, $\varphi = 72^\circ$ (в)

ответного сигнала на вход РЛЗ, в то время как на точность работы системы БВРЛ также оказывает влияние ошибка в определении момента поступления запросного сигнала от РЛЗ на вход ПП. Нестабильности параметров работы РЛЗ в общем случае также могут сказываться на точности работы БВРЛ, однако в контролируемой системе сами параметры работы РЛЗ априори известны, в то время как в СДК они измеряются в процессе ее работы. Очевидно, при наличии в РЛЗ неста-

бильности в скорости вращения антенны и нестабильности в работе тактового генератора, несмотря на априорные сведения о значениях данных параметров, в системе БВРЛ также неизбежны ошибки. Тем не менее, в отличие от СДК, в данном случае существует возможность организации дополнительного канала связи между ПП БВРЛ и РЛЗ, по которому передаются временные метки, соответствующие моментам излучения запросных сигналов. Кроме того, при наличии в РЛЗ дополнительной

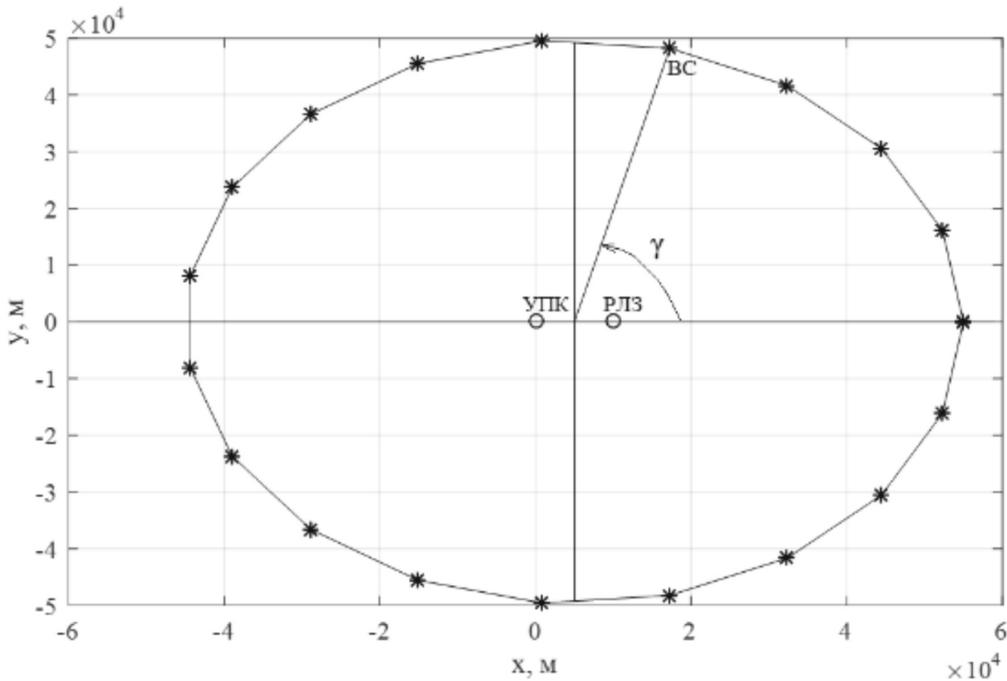


Рис. 6. Положения ВС относительно РЛЗ и УПК
Fig. 6. The aircraft locations related to the SSR and RAS

всенаправленной антенны подавления ответов на запросы, полученные по боковым лепесткам основной антенны РЛЗ, существует возможность отслеживать моменты излучения запросных сигналов с помощью анализа момента поступления импульса подавления, специально излучаемого всенаправленной антенной*. Однако в подобном случае в равной степени можно анализировать данный импульс и на СДК.

В связи с тем, что при анализе системы контроля следует рассматривать наихудшую ситуацию, рассмотрим случай отсутствия у РЛЗ антенны подавления ответов на запросы, полученные по боковым лепесткам антенны запросчика. Проведем сравнение точности работы СДК при отсутствии

априорных сведений о параметрах работы РЛЗ с точностью работы контролируемой системы БВРЛ при наличии у нее априорных сведений о периоде вращения антенны РЛЗ. При этом местоположение РЛЗ для СДК считается известным.

Зависимости СКО $\sigma_{\delta R}$ ошибки δR от величины γ для различных значений d^2 отношения сигнал/шум на выходе устройства обработки в УПК при приеме запросных сигналов представлены на рис. 7 для СДК и МВРЛ (а) и СДК и БВРЛ (б). При этом расстояние от ПП до РЛЗ полагается равным расстоянию от УПК до РЛЗ. Время анализа, в течение которого на СДК определяются значения параметров T_c и T , равно $N = 5$ оборотам антенны РЛЗ. Из рисунка видно, что в рассматриваемых условиях точность работы СДК всегда оказывается ниже точности работы системы МВРЛ при любом положении ВС относительно РЛЗ, но при некоторых условиях может оказаться выше точности работы системы БВРЛ. Так, если ВС располагается таким образом, что $\gamma = \pi$ для СДК и одновременно $\gamma = 2\pi$

* Авиационная электросвязь. Т. 4. Системы наблюдения и предупреждения столкновений // Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Международная организация гражданской авиации, 2007.

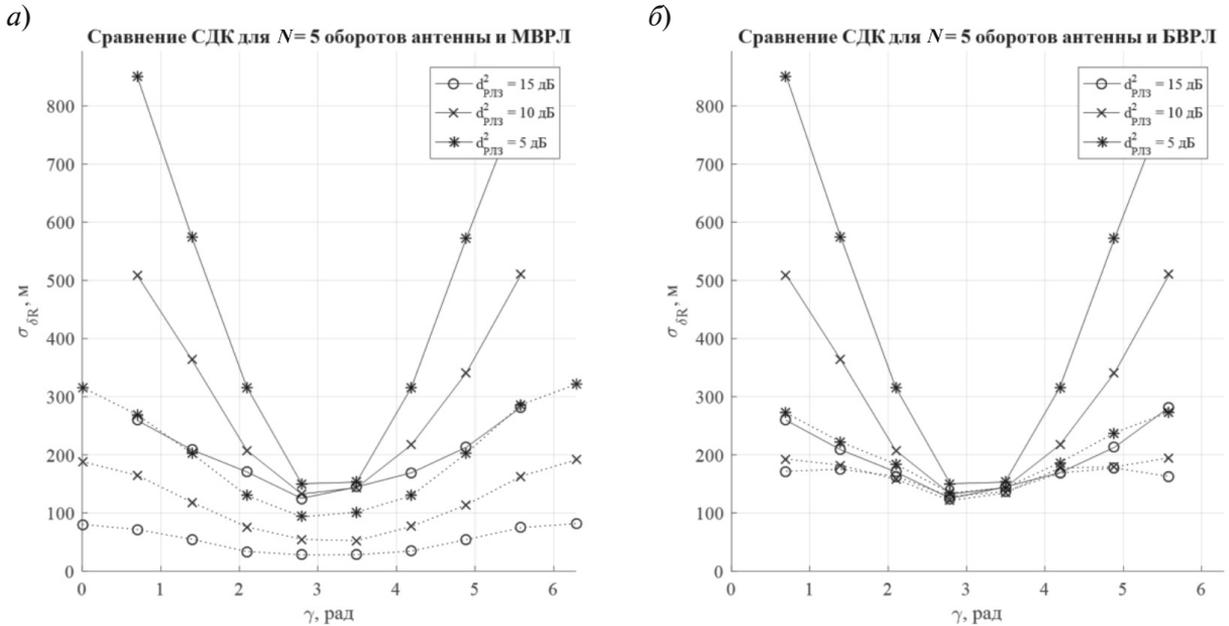


Рис. 7. СКО ошибки в определении местоположения ВС в СДК (—) и в контролируемых системах МВРЛ (а) и БВРЛ (б) (----)

Fig. 7. Aircraft location error standard deviation in the RCS (—) and in the controlled monostatic (a) and bistatic (б) SSR systems (----)

для БВРЛ, то точность работы СДК оказывается выше. Вместе с тем, для каждого значения угла γ в системе БВРЛ и для того же значения γ в СДК точность СДК неизбежно ниже точности системы БВРЛ, и разница в точности становится тем больше, чем ниже отношение сигнал/шум и чем ближе значение угла γ к 2π .

Заключение

В результате проведенного моделирования получены следующие результаты.

1. Распределение ошибки δR в работе СДК может быть аппроксимировано как частным случаем четырехпараметрического распределения (распределением Хойта), так и, с некоторой погрешностью, распределением Накагами. Качество данных аппроксимаций зависит от значения коэффициента корреляции r между случайными величинами δx и δy и ухудшается при приближении величины $|r|$ к единице. Такие аппроксимации позволяют определить моменты распределения ошибки δR аналитически.

2. Наихудшим для рассмотренного метода контроля случаев является тот, при котором в СДК отсутствует возможность определения моментов излучения запросных сигналов по импульсам, излучаемым дополнительной антенной РЛЗ. При этом ошибки, связанные с нестабильностью периода следования запросных сигналов, и ошибки, связанные с наличием АБГШ, в рассмотренных в работе условиях (при $\sigma_{\delta T_{ci}} \approx 5 \cdot 10^{-9}$, $\sigma_{\delta v_i} \approx 0,01$, $d^2 \approx 15$) оказывают примерно одинаковое влияние на точность работы СДК и влекут за собой ошибки в определении местоположения ВС с СКО порядка 100 м, в то время как ошибка, связанная с нестабильностью скорости вращения антенны РЛЗ, оказывает меньшее влияние и приводит к значению $\sigma_{\delta R}$, меньшему на несколько десятков метров. В этих же условиях прочие системные ошибки (связанные с эшелонированием высоты и с дискретным характером следования сигналов) приводят к меньшим примерно на порядок значениям СКО ошибок в определении местоположения ВС.

3. В отличие от СДК, в системах БВРЛ, как правило, известен режим работы РЛЗ. В подобной ситуации в худшем случае разница в точности работы СДК и контролируемой системы БВРЛ достигает нескольких сотен метров (так, при $d^2 = 5$ дБ различие в точности может достигать 600 м). Такой худший случай соответствует расположению ВС таким образом, что $\gamma = 2\pi$ для СДК и $\gamma = \pi$ для контролируемой ВРЛ. Наименьшая разница в точности рассматриваемых систем и одновременно с этим наименьшее значение $\sigma_{\delta R}$ достигается при расположении проекции ВС на одной линии с ПП, РЛЗ и УПК так, что $\gamma = \pi$ (так, точность работы СДК и системы БВРЛ оказывается сопоставимой и равной 150 м для всех рассмотренных значений d^2 , в то время как точность работы системы МВРЛ достигает примерно 20 м при $d^2 = 15$ дБ). Таким образом, для повышения точности работы СДК необходимо расположить УПК так, чтобы вероятность появления ВС была максимальной в области, обеспечивающей выполнение условия $\gamma = \pi$. Кроме того, точность работы СДК всегда ниже точности работы системы МВРЛ, но и в этом случае разли-

ца в точности работы данных систем оказывается минимальной (порядка 10–100 м для рассматриваемых значений d^2) также в случае расположения ВС, обеспечивающем $\gamma = \pi$.

Рассмотренные системы контроля могут быть отнесены к классу пассивных систем ВРЛ [14–17], в которых местоположение ВС определяется в результате анализа запросных сигналов РЛЗ другой, активной, системы ВРЛ и соответствующих ответных сигналов от ВС [2, 3, 12]. Такие системы находят применение в районах с активным воздушным движением и большим количеством близко расположенных аэропортов, в результате чего может оказаться нецелесообразным и, более того, нежелательным устанавливать классическую активную систему ВРЛ в каждом аэропорту. Применение пассивных систем ВРЛ позволяет снизить количество запросных сигналов в эфире. Однако в подобных системах положение РЛЗ является, в общем случае, неизвестным, и точность определения его местоположения неизбежно окажет влияние на точность работы системы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skolnik M. Radar Handbook. 3rd ed. The McGraw-Hill Company, 2008. 1350 p.
2. Otsuyama T., Honda J., Shiomi K., Minorikawa G., Hamanaka Y. Performance Evaluation of Passive Secondary Surveillance Radar for Small Aircraft Surveillance // European Radar Conf. (EuRAD). 2015. Pp. 505–508.
3. Shiomi K., Senoguchi A., Aoyama S. Development of Mobile Passive Secondary Surveillance Radar // 28th Internat. Congress of the Aeronautical Sciences, 2012
4. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. Минск: Техника, 1978. 148 с.
5. Willis N.J., Griffiths H.D. Advances in Bistatic Radar. SciTech Publishing, Inc., 2007. 491 p.
6. Казаринов Ю.М., Коломенский Ю.А., Курузов В.М., Леонтьев В.В., Маругин А.С., Орлов В.К., Подкопаев Б.П., Ульяницкий Ю.Д. Радиотехнические системы. М.: Академия, 2008. 590 с.
7. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
8. Ковалев Ф.Н. Точность определения цели в бистатической радиолокационной системе // Радиотехника. 2013. № 8. С. 56–59.
9. Руководство по авиационному наблюдению. Международная организация гражданской авиации, 2010.
10. Zhang J., Liu W., Zhu Y. Study of ADS-B Data Evaluation. China Measurement & Test, 2013. No. 1.
11. Рыгов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. М.: Наука, 1976. 494 с.
12. Honda J., Otsuyama T. Estimation of Target Detection Rate in Aircraft Surveillance System // Internat. Conf. on Network-Based Information Systems. 2013. Pp. 561–565.
13. Fränken D., Hüpper A. Aircraft Positioning with Secondary Surveillance Radar and Time of Arrival Measurements // 14th Internat. Radar Symp. 2013.

14. **Kim E., Sivits K.** Blended secondary surveillance radar solutions to improve air traffic surveillance // *Aerospace Science and Technology*. 2015. Vol. 45. Pp. 203–208

15. **Wang Y., Bao Q., Wang D.** An Experimental Study of Passive Bistatic Radar Using Uncooperative Radar as a Transmitter // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015. Vol. 12. Iss. 9. Pp. 1868–1872.

16. **Wang D., Bao Q., Tian R., Chen Z.** Bistatic weak target detection method using non-cooperative air surveillance radar // *Journal of Systems*

Engineering and Electronics. 2015. Vol. 26. Iss. 5. Pp. 954–963.

17. **Malanowski M.** Detection and parameter estimation of manoeuvring targets with passive bistatic radar // *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2012. Vol. 6, Iss. 8. Pp. 739–745.

18. **Загребин И.В., Романов А.В.** Модернизация электропривода вращения антенны вторичного радиолокатора «Корень-АС» // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники: труды региональной студенческой науч.-техн. конф. 2004. С. 21–24.

Статья поступила в редакцию 30.04.2017

REFERENCES

1. **Skolnik M.** *Radar Handbook*. 3rd Edition. The McGraw-Hill Company, 2008, 1350 p.

2. **Otsuyama T., Honda J., Shiomi K., Minorikawa G., Hamanaka Y.** Performance Evaluation of Passive Secondary Surveillance Radar for Small Aircraft Surveillance. *European Radar Conference (EuRAD)*, 2015, Pp. 505–508.

3. **Shiomi K., Senoguchi A., Aoyama S.** Development of Mobile Passive Secondary Surveillance Radar. *28th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2012

4. **Averyanov V.Ya.** *Raznesennyye radiolokatsionnyye stantsii i sistemy [Distant radar stations and systems]*. Minsk.: Tekhnika Publ., 1978, 148 p. (rus)

5. **Willis N.J., Griffiths H.D.** *Advances in Bistatic Radar*. SciTech Publishing, Inc., 2007, 491 p.

6. **Kazarinov Yu.M., Kolomenskiy Yu.A., Kutuzov V.M., Leontyev V.V., Marugin A.S., Orlov V.K., Podkopayev B.P., Ulyanitskiy Yu.D.** *Radiotekhnicheskiye sistemy [Radio engineering systems]*. Moscow: Akademiya Publ., 2008, 590 p. (rus)

7. **Klovskiy D.D.** *Peredacha diskretnykh soobshcheniy po radiokanalam [Transmission of discrete messages over radio channels]*. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1982, 304 p. (rus)

8. **Kovalev F.N.** Tochnost opredeleniya tseli v bistaticheskoy radiolokatsionnoy sisteme [Target location accuracy in the bistatic radar]. *Radiotekhnika [Radioengineering]*, 2013, No. 8, Pp. 56–59. (rus)

9. *Rukovodstvo po aviatsionnomu nablyudeniyu. Mezhdunarodnaya organizatsiya grazhdanskoy aviatsii*, 2010. (rus)

10. **Zhang J., Liu W., Zhu Y.** Study of ADS-B Data Evaluation. *China Measurement & Test*, 2013, No. 1.

11. **Rytov S.M., Kravtsov Yu.A., Tatarskiy V.I.** *Vvedeniye v statisticheskuyu radiofiziku. Chast I [Introduction to Statistical Radiophysics. Part I]*.

Moscow: Nauka Publ., 1976, 494 p. (rus)

12. **Honda J., Otsuyama T.** Estimation of Target Detection Rate in Aircraft Surveillance System. *International Conference on Network-Based Information Systems*, 2013, Pp. 561–565.

13. **Fränken D., Hüpper A.** Aircraft Positioning with Secondary Surveillance Radar and Time of Arrival Measurements. *14th Internat. Radar Symposium (IRS)*, 2013.

14. **Kim E., Sivits K.** Blended secondary surveillance radar solutions to improve air traffic surveillance. *Aerospace Science and Technology*, 2015, Vol.45, Pp. 203–208.

15. **Wang Y., Bao Q., Wang D.** An Experimental Study of Passive Bistatic Radar Using Uncooperative Radar as a Transmitter. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, Vol. 12, Issue 9, Pp. 1868–1872.

16. **Wang D., Bao Q., Tian R., Chen Z.** Bistatic weak target detection method using non-cooperative air surveillance radar. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, Vol. 26, Issue 5, Pp. 954–963.

17. **Malanowski M.** Detection and parameter estimation of manoeuvring targets with passive bistatic radar. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, Vol. 6, Issue 8, Pp. 739–745.

18. **Zagrebin I.V., Romanov A.V.** Modernizatsiya elektroprivoda vrashcheniya anteny vtorichnogo radiolokatora “Koren-AS” [Modernization of the electric drive of rotation of the antenna of the secondary radar “Koren-AS”]. *Prikladnyye zadachi elektromekhaniki, energetiki, elektroniki: Trudy regionalnoy studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Proceedings of the Regional Student Scientific and Technical Conference “Applied Problems of Electromechanics, Power Engineering, Electronics”]*, 2004, Pp. 21–24. (rus)

Received 30.04.2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ЦИКИН Игорь Анатольевич

TSIKIN Igor A.

E-mail: tsikin@mail.spbstu.ru

ПОКЛОНСКАЯ Екатерина Сергеевна

POKLONSKAYA Ekaterina S.

E-mail: catherine091@mail.ru



Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

DOI: 10.18721/JCSTCS.10206

УДК 004.942

ШАГОВЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ ГРОЗОЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

Д.С. Шишигин, С.Л. Шишигин

Вологодский государственный университет,
г. Вологда, Российская Федерация

Удар молнии в воздушную линию электропередач вызывает волну перенапряжения, которая может быть опасна для электрооборудования электрических подстанций. Моделирование волновых процессов обычно проводится в программе ЕМТР на основе цепных схем. Проблемой является осцилляция напряжения при воздействии импульса тока с коротким фронтом, что связано с использованием формулы трапеций для интегрирования дифференциальных уравнений. Комбинация формулы трапеций с неявной формулой Эйлера, предлагаемая в ЕМТР, не решает проблемы. Идея работы заключается в адаптации и применении хорошо разработанных цепно-полевых моделей, методов и программ теории заземления в задачах грозозащиты. Тогда волновые процессы моделируются совместно с процессами растекания тока в заземлителях. Показаны очевидные преимущества формул интегрирования высокого порядка Влаха и Сингала по сравнению с формулой трапеций. В качестве практического примера рассчитаны волны перенапряжения на силовом и измерительном трансформаторе подстанции, обусловленные ударом молнии в опору воздушной линии с перекрытием изоляции. Показан эффект от установки ОПН.

Ключевые слова: грозозащита; волновые процессы; ЕМТР; формула трапеций; метод Влаха; шаговые алгоритмы; перенапряжения; численное моделирование; электрическая подстанция; ОПН.

Ссылка при цитировании: Шишигин Д.С., Шишигин С.Л. Шаговые алгоритмы расчета волновых процессов в задачах грозозащиты электрических подстанций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 75–84. DOI: 10.18721/JCSTCS.10206

STEP ALGORITHMS FOR WAVE PROCESSES CALCULATION IN PROBLEMS OF LIGHTNING PROTECTION AT ELECTRIC POWER SUBSTATIONS

D.S. Shishigin, S.L. Shishigin

Vologda State University,
Vologda, Russian Federation

When lightning strikes into an overhead transmission line, a voltage surge occurs that can be dangerous for electrical equipment at electric power substations. Wave

processes modeling is usually carried out in the EMTP program which is based on circuit models. The problem is the voltage oscillations caused by short front impulse current due to the use of trapezoid formula for differential equations integration. The combination of trapezoid and implicit Euler formulas, suggested in EMTP, does not solve the problem. The idea of this paper is adaptation and application of well-developed hybrid (EM field-circuit) models, methods and programs of the grounding theory for lightning protection problems. This way, wave processes are simulated together with current spreading processes in grounding conductors. The evident advantages of Vlach's and Singhal's high-order integration formulas compared to the trapezoid formula are shown. As a practical example, we have calculated voltage surges at power and measuring transformers of a substation caused by a lightning strike into a transmission line tower with insulator flashover. The effect of mounting surge arresters is shown.

Keywords: lightning protection; wave processes; EMTP; trapezoid formula; Vlach method; step algorithms; voltage surge; numerical modeling; electric power substation; surge arrester.

Citation: Shishigin D.S., Shishigin S.L. Step algorithms for wave processes calculation in problems of lightning protection at electric power substations. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 2, Pp. 75–84. DOI: 10.18721/JCSTCS.10206

Разряд молнии в грозозащитный трос или опору воздушной линии (ВЛ) с последующим перекрытием линейной изоляции, а также прорыв молнии на провода вызывает волну перенапряжения, распространение которой опасно для электрооборудования электрической подстанции (ПС) [1].

Наиболее часто задачи грозозащиты ВЛ и ПС решаются с помощью программы EMTP, например [1, 2]. Это мощная схемотехническая программа, включающая элементы электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, достоинства которой хорошо известны.

К недостаткам EMTP многие зарубежные исследователи относят формулу трапеций, используемую для интегрирования дифференциальных уравнений, поскольку она приводит к осцилляциям напряжения при воздействии импульсов тока с коротким фронтом [3]. Комбинация формулы трапеций с неявной формулой Эйлера [4], рекомендуемая EMTP, не снимает проблему.

Результаты моделирования волновых процессов в проводах ВЛ и шинах ПС существенно зависят от процессов растекания тока молнии в заземлителях [5]. Учет всех гальванических, емкостных и особенно магнитных связей (весьма сильных при импульсных воздействиях) между проводниками в земле и воздухе, с учетом 3D геометрии системы — необходимое условие адекватности расчетов. От цепных моделей,

предлагаемых в EMTP, все чаще переходят к электромагнитным моделям с использованием программы FDTD [6]. Главной проблемой здесь остается описание множества тонких проводников с помощью ортогональных сеток, несмотря на значительные усилия по преодолению этого ограничения. Теория антенн или теория заземления, оперирующие с произвольными тонкими проводниками, не требующие искусственного замыкания расчетной области в задачах открытого типа, значительно эффективнее.

В теории заземления хорошо зарекомендовали себя гибридные (цепно-полевые) модели тонких проводников, позволяющие проводить расчеты переходных электромагнитных процессов и полей одновременно [7, 8]. Это позволяет решать весь комплекс задач заземления, молниезащиты и электромагнитной совместимости (ЭМС) на ПС по единым моделям, методам, программам с использованием общей геометрической модели проводников.

Цели настоящей работы — моделирование волновых процессов в проводниках ВЛ и ПС с учетом растекания тока в земле на основе моделей, методов и компьютерных программ теории заземления и описание преимуществ шаговых алгоритмов расчета переходных (волновых) процессов во временной области с использованием формул высокого порядка, разработанных Влахом и Сингхалом, по сравнению с формулой

трапеций, используемой в ЕМТР и многих аналогичных программах.

Цепно-полевая модель тонкого проводника. Проводники дробятся на цилиндрические элементы малой (по сравнению с длиной электромагнитной волны) длины (рис. 1 а). Для проводников некруглого сечения найдены эквивалентные радиусы [7]. Элементы описываются квадратными, полностью заполненными матрицами проводимостей растекания G , индуктивности M и емкостных коэффициентов C , которые рассчитываются в статическом приближении интегральными методами теории поля [7]. Каждому элементу ставится в соответствие П-четырёхполюсник, что дает цепную схему. Элементы матриц G и C , найденные в средних точках элементов, переносятся в узлы [7]. Получается сложная электрическая схема, топология и параметры которой определяются автоматически. Напряжения и токи в этой схеме рассчитываются матричными методами теории цепей. При расчетах шаговыми алгоритмами нелинейные сопротивления моделируются статическими сопротивлениями с кусочно-постоянными характеристиками, величины

которых определяются в начале каждого временного шага. Разработаны эффективные алгоритмы учета частотно-зависимых сопротивлений во временной области [7]. После расчета токов в цепной модели возвращаемся к полевой модели для расчета напряженностей электрического и магнитного поля.

Шаговые алгоритмы расчета переходных процессов при импульсных воздействиях. Метод дискретных схем. Разобьем временной интервал на n равных шагов длиной h и выполним интегрирование дифференциальных соотношений между напряжениями и токами индуктивности и емкости на k -м временном шаге.

При использовании неявной формулы Эйлера:

$$u = L \frac{di}{dt} \Rightarrow u_{k+1} = L \frac{i_{k+1} - i_k}{h} = \frac{L}{h} i_{k+1} - \frac{L}{h} i_k = Ri_{k+1} + E_k, \tag{1}$$

$$i = C \frac{du}{dt} \Rightarrow i_{k+1} = C \frac{u_{k+1} - u_k}{h} = \frac{C}{h} u_{k+1} - \frac{C}{h} u_k = Gu_{k+1} + J_k. \tag{2}$$

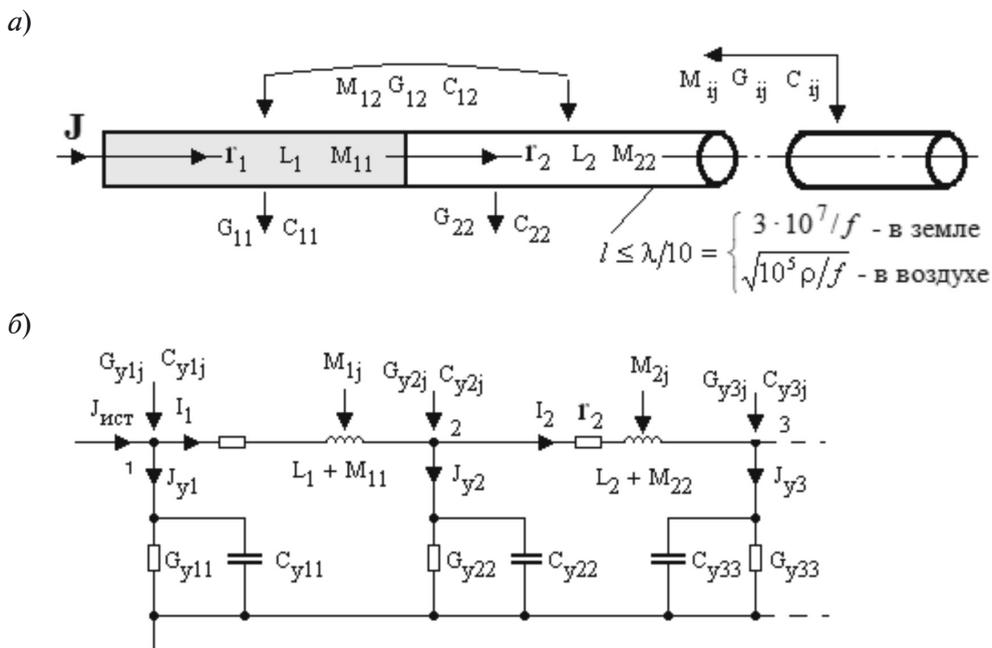


Рис. 1. Цепно-полевая модель тонкого проводника
Fig. 1. Hybrid (EM field-circuit) thin-wire model

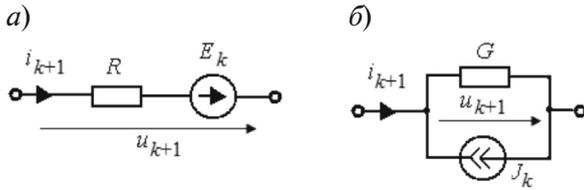


Рис. 2. Дискретные схемы замещения индуктивности (а) и емкости (б) на k -м шаге
Fig. 2. Equivalent discrete circuits of inductance (а) and capacitance (б) at k -step

При использовании формулы трапеций

$$u = L \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{u_{k+1} + u_k}{2} = L \frac{i_{k+1} - i_k}{h} \Rightarrow u_{k+1} = \frac{2L}{h} i_{k+1} - \left(u_k + \frac{2L}{h} i_k \right) = Ri_{k+1} + E_k, \quad (3)$$

$$i = C \frac{du}{dt} \Rightarrow \frac{i_{k+1} + i_k}{2} = C \frac{u_{k+1} - u_k}{h} \Rightarrow i_{k+1} = \frac{2C}{h} u_{k+1} - \left(i_k + \frac{2C}{h} u_k \right) = Gu_{k+1} + J_k. \quad (4)$$

Этим уравнениям соответствуют дискретные схемы замещения (рис. 2)

Таким образом, замена индуктивностей и емкостей дискретными резистивными моделями позволяет заменить дифференциальные уравнения алгебраическими, а задача расчета переходного процесса сведена к расчету резистивных цепей на каждом временном шаге. Матрицы сопротивлений \mathbf{R} и проводимостей \mathbf{G} вычисляются один раз и не меняются при $h = \text{const}$, что обеспечивает высокое быстродействие при расчете сложных цепей. Пересчету подлежат величины источников ЭДС и тока, которые задают начальные напряжения и токи шага, но это не снижает быстродействие.

Недостатки формул Эйлера и трапеций известны, например [9]. Формула Эйлера недостаточно точна и сглаживает колебания, аналогично фильтру низких частот, поэтому используется редко. Формула трапеций при определенных условиях вызывает несуществующие высокочастотные затухающие колебания, что является проблемой в задачах грозозащиты, при импульсных воздействиях.

Покажем эту проблему на примере [4].

К индуктивности L применен импульс тока с линейным фронтом длительностью T с единичной амплитудой (рис. 3). Требуется найти напряжение на индуктивности. Выберем шаг интегрирования $h = T$ и применим формулу трапеций (3). Сделаем несколько шагов при $L/h = 1$

$$\begin{aligned} i_0 &= 0, i_1 = i_2 = \dots = i_n = 1, \\ u_0 &= 0, \\ u_1 &= 2L/h \cdot i_1 - (u_0 + 2L/h \cdot i_0) = 2, \\ u_2 &= 2L/h \cdot i_2 - (u_1 + 2L/h \cdot i_1) = -2, \\ u_{k+1} &= -u_k. \end{aligned}$$

Таким образом, решение осциллирующее. Численные расчеты с различными шагами также приводят к осциллирующему решению (рис. 3). Интересно, что неявная формула Эйлера (1) дает в этой задаче точное решение $u_0 = 0, u_1 = 1, u_2 = u_3 = \dots = u_n = 0$.

Для устранения данной проблемы в [4] предлагается линейная комбинация формулы трапеций с неявной формулой Эйлера:

$$\begin{aligned} i_{k+1} &= \alpha \left[i_k + \frac{h}{L} u_{k+1} \right] + \\ &+ (1 - \alpha) \left[i_k + \frac{h}{2L} (u_{k+1} + u_k) \right] = \\ &= i_k + \frac{h}{2L} [u_{k+1}(1 + \alpha) + u_k(1 - \alpha)], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha = 0,15$ – весовой коэффициент.

Этой формуле приближенно соответствует схема замещения, где параллельно индуктивности включается резистор с проводимостью $G = 0,15h/2L$ (рис. 3). Данная методика рекомендуется руководством к программе ЕМТР.

При исследовании (5) установлено: 1) этот способ не позволяет исключить осцилляции (см. рис. 3); 2) значение $\alpha = 0,15$ получено эмпирически, оно не является универсальным, оптимальный весовой коэффициент α зависит от шага h ; 3) схемная реализация (5) в виде GL цепи не является точной – требуется включить еще источник тока с изменяющимися на каждом шаге параметрами, что пользователю сделать невозможно. Таким образом, рассмотренный способ, рекомендуемый в ЕМТР, нельзя считать эффективным.

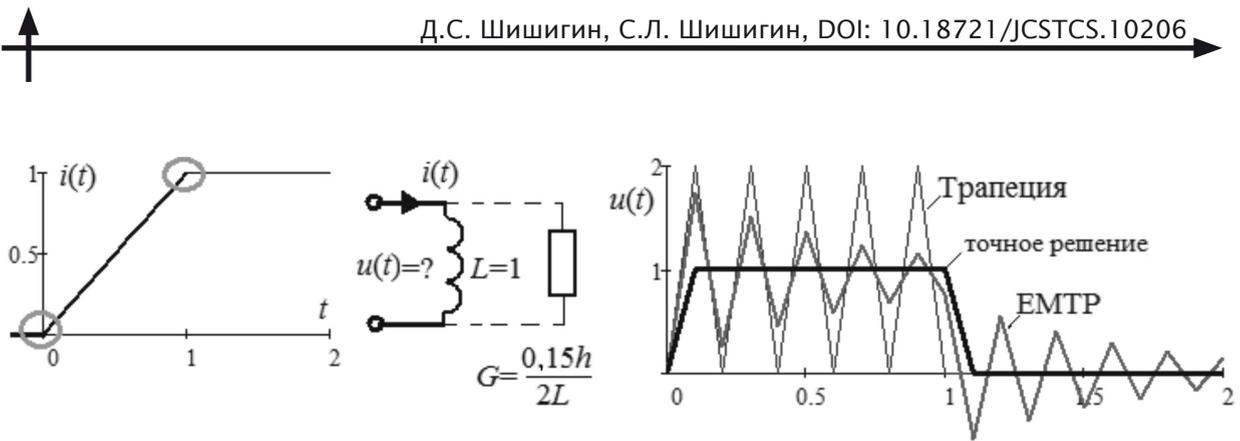


Рис. 3. К исследованию формулы трапеций и способа EMTP по устранению осцилляций
 Fig. 3. Research of trapezoid formula and EMTP method of oscillations elimination

Исследование других формул интегрирования для разработки дискретных моделей индуктивности и емкости – очевидное направление развития метода дискретных схем. Одношаговые формулы более высокого порядка (Рунге–Кутты) не обладают абсолютной устойчивостью [10], поэтому из рассмотрения исключаются. Для решения жестких задач возможно применение многошаговых формул «с забеганием вперед» (формула Гира и др.), но они ведут к нелинейным моделям и существенно усложняют алгоритм. Наиболее эффективный подход к получению дискретных схем, типа изображенных на рис. 2, на основе абсолютно устойчивых, одношаговых формул интегрирования высокого порядка дает операторный метод.

Шаговые алгоритмы Влаха и Сингхала на основе операторного метода. Операторная схема замещения индуктивности – последовательное соединение операторного сопротивления sL и ЭДС $E = Li(0)$, учитывающей начальные условия. Операторная схема замещения емкости – параллельное соединение проводимости $G = sC$ и источника тока $J = Cu(0)$. Заменяв все индуктивности и емкости их операторными моделями, получаем операторную схему замещения. При численных расчетах необходимо задать значение оператора s (его часто называют комплексной частотой), а для перехода к оригиналу применить теорему о вычетах. Обычно она записывается в виде $f(t) = \sum_i \text{Res}_s F(s_i) e^{s_i t}$, где вычеты операторной функции $F(s)$ находим в полюсах s_i . Нахождение полюсов – трудоемкая

операция, которую приходится выполнять заново для каждой операторной функции, поэтому этот путь неэффективен при численных расчетах.

Канадские ученые И. Влах и К. Сингхал предложили в теореме о вычетах вместо полюсов операторной функции использовать полюса экспоненты [11]:

$$f(t) = \sum_i \text{Res}_{z_i} F(z_i / t) e^{z_i}, \quad z = st.$$

Достоинство этой записи в том, что полюса экспоненты вычисляются аналитически один раз, а затем применимы для любой операторной функции.

Аппроксимируем экспоненту дробно-рациональной функцией, коэффициенты которой найдем из сопоставления с разложением экспоненты в ряд Тейлора:

$$e^z \approx \frac{a_0 + a_1 z + \dots + a_n z^n}{1 + b_1 z + \dots + b_m z^m}, \quad m > n.$$

Например, для практически важного случая $m = 2, n = 1$:

$$e^z \approx (1 + z / 3) / (1 - 2z / 3 + z^2 / 6).$$

Определив полюса экспоненты, теорема вычетов принимает вид [11]:

$$f(t) = \text{Re}((5\sqrt{2}j - 2)F(s)) / t, \quad (6)$$

$$s = (2 + \sqrt{2}j) / t, \quad t > 0.$$

Полученная формула имеет 3 порядок точности ($m + n = 3$) и для ее использования необходимо вычислить операторную функцию один раз. Далее имеет смысл рассматривать формулы 7, 11, 15 и т. д. порядка с 2, 3, 4 и т. д. вычислениями операторной функции. Все они абсолютно устойчивы при интегрировании тестового дифферен-

циального уравнения $x' = \lambda x$ при $\lambda < 0$ [11].

Рассмотрим шаговый алгоритм на основе (6). Временной интервал разбивается на n равных шагов длиной h . Поскольку s – комплексное число (комплексная частота), то расчету на каждом k -м шаге подлежит комплексная схема, где индуктивности и емкости моделируются дискретными схемами (см. рис. 2) при $R = sL$, $E_k = Li_k$, $G = sC$, $J_k = Cu_k$. При фиксированном шаге сопротивления R и проводимости G не меняются, что обеспечивает высокое быстродействие расчета сложных схем. Переменными являются источники ЭДС и тока, учитывающие начальные условия шага.

Таким образом, шаговые алгоритмы Влахы и Сингхала полностью совпадают с шаговыми алгоритмами метода дискретных схем на основе формул Эйлера и трапеций, но имеют более высокий порядок точности и оперируют с комплексными схемами. Поэтому мы вправе отнести их к методу дискретных схем.

Тестирование шаговых алгоритмов. Рассчитаем волновые процессы в линии без потерь длиной 300 м, при воздействии импульса напряжения амплитудой 1 В, с линейным фронтом 0,1 мкс (рис. 4).

Будем рассматривать напряжение в конце линии, в режиме холостого хода. Точное решение дает теория длинных линий. В течение 1 мкс, что равно времени пробега электромагнитной волны от начала до конца линии (запаздывания), напряжение равно нулю. Затем возникает отраженная волна, равная падающей волне, и напряжение удваивается, что продолжается 2 мкс. За это время отраженная волна распространяется к началу линии и возвращается обратно с изменением знака (режим КЗ для идеального источника ЭДС). Теперь отраженная волна противоположна падающей волне, и результирующее напряжение равно нулю. Процесс повторяется с периодом 4 мкс (рис. 4, график 0).

Выполним расчеты по разным форму-

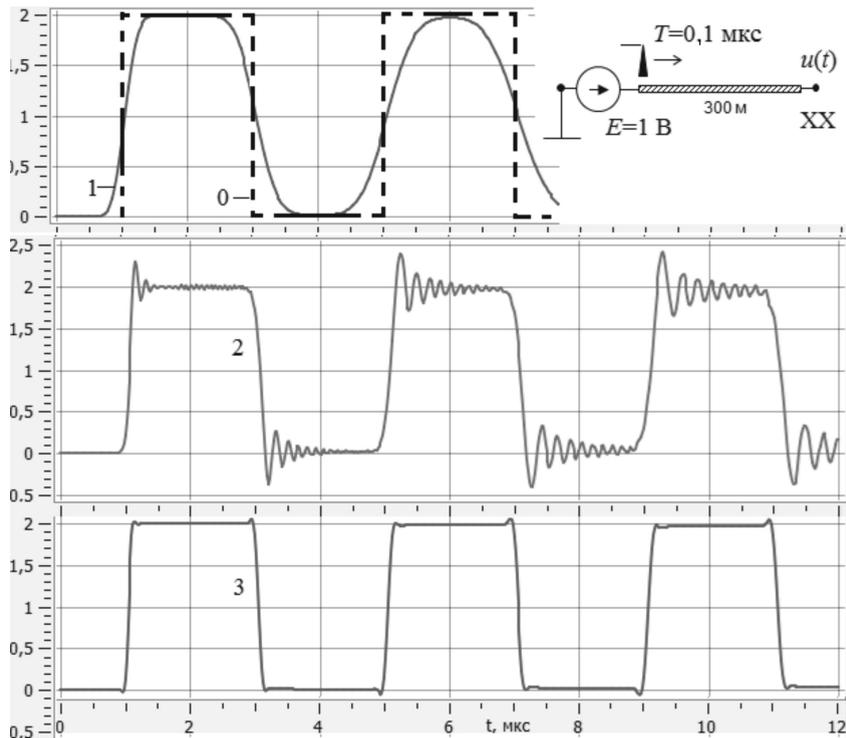


Рис. 4. Напряжение в конце линии длиной 300 м в режиме холостого хода: 0 – точное решение; 1 – формула Эйлера; 2 – формула трапеций; 3 – формула (6)

Fig. 4. Voltage at the end of the transmission line (300 m length, no load mode): 0 – exact solution; 1 – Euler formula; 2 – trapezoid formula; 3 – formula (6)

лам интегрирования. Использование формулы Эйлера (рис. 4, график 1) приводит к заметной погрешности так, что скорость волны превышает скорость света. Формула трапеций правильно моделирует запаздывание волны, но приводит к локальным затухающим колебаниям и большой погрешности (рис. 4, график 2). Амплитуда этих колебаний нарастает с каждым периодом и может привести к нарушению устойчивости.

Формула (6) моделирует процессы (рис. 4, график 3) с достаточной точностью (2 %). Опыт использования (6) позволяет рекомендовать ее в качестве альтернативы формулы трапеций, используемой в настоящее время в программе EMTP и других аналогичных программах.

Программное обеспечение. Рассмотренные модели и методы реализованы в программе ЗУМ, предназначенной для решения комплекса задач молниезащиты, заземления, ЭМС электрических подстанций с использованием 3D модели ПС и ВЛ [12]. Существующая версия программы

интегрирована в AutoCAD по технологии ObjectARX [13], что позволяет проектировщику проводить геометрическое моделирование стандартными средствами, а также визуализировать результаты расчетов, включая анимацию волновых процессов.

Моделирование волновых процессов.

При ударе молнии в опору ВЛ вблизи ПС происходит обратное перекрытие гирлянды изоляторов опоры и волна перенапряжения, распространяясь по фазному проводу, далее по шинам ПС, воздействует на изоляцию высоковольтного оборудования ПС (рис. 5). На расчетной модели оборудование ПС моделируется входными емкостями, выбранными согласно РД 153-34.3-35.125-99 (далее РД-99). Длина гирлянды изоляторов опоры ВЛ принята 1 м, вольт-секундная характеристика изоляторов также принята по РД-99. Удельное сопротивление грунта принято 200 Ом·м. При близком к ПС ударе молнии влиянием импульсной короны и потерями в земле можно пренебречь.

Рассмотрим напряжение на силовом трансформаторе. В первый момент времени

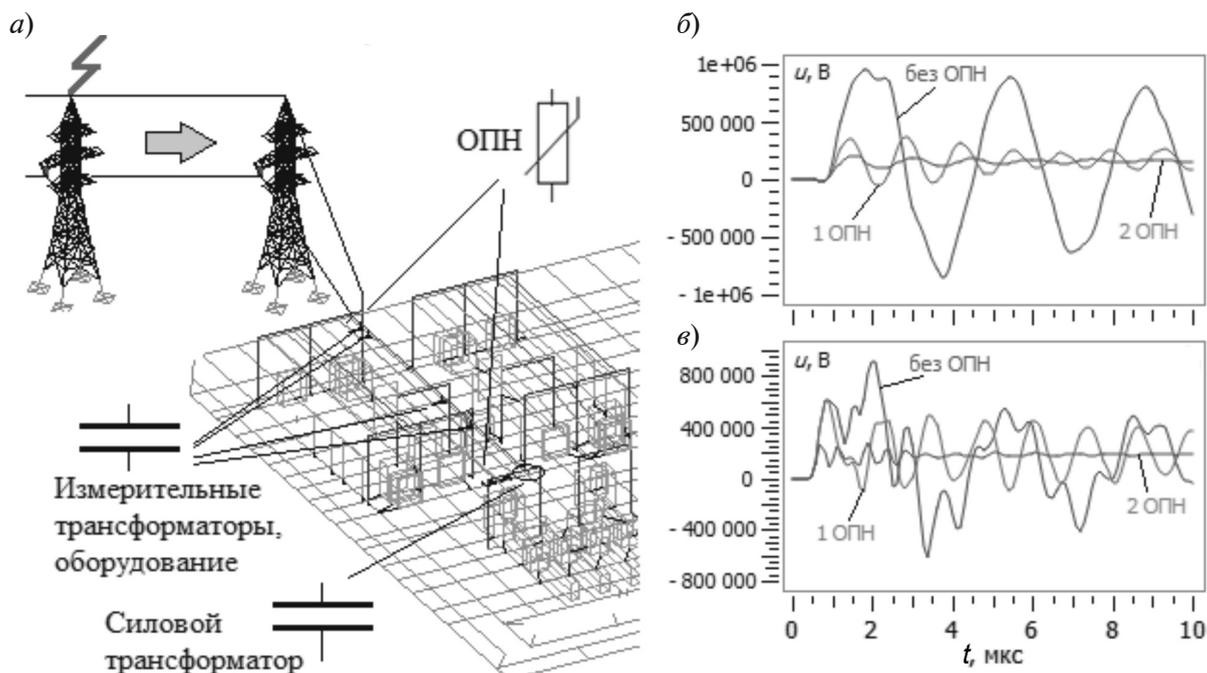


Рис. 5. Модель ПС и ВЛ (а); напряжение на силовом трансформаторе (б); напряжение на измерительном трансформаторе (в)

Fig. 5. Power substation and transmission line model (a); Voltage at power transformer (b); Voltage at measuring transformer (c)

емкость, которая моделирует трансформатор, разряжена, поэтому напряжение равно нулю, затем емкость заряжается, ее эквивалентное сопротивление резко возрастает, что приводит к удвоению напряжения падающей волны. В результате процесс отражения волны носит колебательный характер. Отраженная волна, возвращаясь к пораженной опоре, повторно отражается с изменением знака и вновь набегаем на ПС. Активное сопротивление проводов и шин достаточно мало, поэтому переходной процесс затухает медленно (рис. 5 б). Амплитуда напряжения на трансформаторе существенно превышает допустимое значение — 470 кВ для сети 110 кВ согласно РД-99.

Установка ОПН вблизи трансформатора существенно снижает амплитуду напряжения (рис. 5 б). Принято считать, что ОПН ограничивает перенапряжение до уровня его остающегося напряжения, но это справедливо только после затухания волновых процессов. В течение волнового процесса максимум напряжения на трансформаторе с учетом напряжения на заземлителе и проводниках от ОПН до заземлителя (спуске и опорной раме) может быть значительно выше (вдвое в данной задаче).

Таким образом, установка ОПН вблизи силового трансформатора ограничивает перенапряжение в рамках допустимого. Однако напряжение на измерительном транс-

форматоре в начале ОРУ, находящегося ближе к источнику тока и удаленного от ОПН, выше, чем на силовом трансформаторе, и превышает допустимое (рис. 5 в).

Надежность защиты электрооборудования можно повысить установкой второго ОПН, который следует размещать на ОРУ, на входе ВЛ [14], что подтверждается расчетами (рис. 5 б, в).

Выводы. Моделирование волновых процессов в задачах грозозащиты ПС, которое обычно проводится на схемных моделях (программа EMTP) или на сеточных моделях электромагнитных полей (программа FDTD), может быть выполнено с использованием гибридной (цепно-полевой) модели проводников, характерной для теории заземления (программа ЗУМ). Более того, гибридный подход имеет следующие достоинства: удобство ввода исходных данных — пользователь рисует 3D геометрическую модель реального объекта, а программа автоматически рассчитывает все параметры полевой и цепной модели, вместо упрощенной EMTP-схемы замещения с исходными данными, вводимыми вручную; общность решения — по единой геометрической модели ВЛ и ПС решается комплекс задач (грозозащиты, заземления, ЭМС, электробезопасности и электромагнитной экологии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов Б.В., Халилов Ф.Х., Новикова А.Н., Гумерова Н.И., Невретдинов Ю.М. Актуальные проблемы защиты высоковольтного оборудования подстанций от грозовых волн, набегающих с воздушных линий // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 8. С. 7–25.
2. Гумерова Н.И., Ефимов Б.В., Селиванов В.Н. Оптимизация схем замещения линий и подстанций для задач анализа показателей надежности грозозащиты подстанций // IV Межд. конф. по молниезащите. СПб., 2014. С. 171–182.
3. Gallagher T.J., Dudurych I.M. Model of corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines // IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. 2004. Vol. 151. No. 1. Pp. 61–66.
4. Alvarado F.L., Lasseter R.H., Sanchez J.J. Testing of trapezoidal integration with damping for the solution of power transient problems // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1983. Vol. PAS-102. No. 12. Pp. 3783–3790.
5. Адамьян Ю.Э., Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И., Колодкин И.С., Коровкин Н.В., Кулигин П.И., Монастырский А.Е., Титков В.В. Зависимость уровня перенапряжений ОПН разных классов напряжения от параметров заземляющих устройств. Эксперимент и моделирование // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 5-13 (39). С. 29–38.
6. Куклин Д.В., Селиванов В.Н. Программное обеспечение для расчета волновых процессов в заземлителях и заземленных объектах // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2015. Т. 18. № 1. С. 137–142.
7. Шишигин С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Элек-

тричество. 2010. № 1. С. 16–23.

8. **Коровкин Н.В., Шишигин С.Л.** Расчетные методы в теории заземления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 1(166). С. 74–79.

9. **Хайрер Э., Ваннер Г.** Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М.: Мир, 1999. 685 с.

10. **Вербжицкий В.М.** Основы численных методов. М.: Высш. шк., 2002. 840 с.

11. **Влах И., Сингхал К.** Машинные методы анализа и проектирования электронных схем.

Статья поступила в редакцию 15.03.2017

REFERENCES

1. **Yefimov B.V., Khalilov F.Kh., Novikova A.N., Gumerova N.I., Nevretdinov Yu.M.** Aktualnyye problemy zashchity vysokovoltного oborudovaniya podstantsiy ot grozovykh voln, nabegayushchikh s vozdukhnykh liniy [The actual problems of high-voltage substation equipment protection from lightning waves surged from power lines]. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, No. 8, Pp. 7–25. (rus)

2. **Gumerova N.I., Yefimov B.V., Selivanov V.N.** Optimizatsiya skhem zameshcheniya liniy i podstantsiy dlya zadach analiza pokazateley nadezhnosti grozozashchity podstantsiy. [Optimization of equivalent circuit of transmission lines and electric substations for problems of analysis of electric substations lightning protection reliability parameters]. *IV Mezhd. konf. po molniyezashchite*. St. Petersburg, 2014, Pp. 171–182. (rus)

3. **Gallagher T.J., Dudurych I.M.** Model of corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines. *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 2004, Vol. 151, No. 1, Pp. 61–66.

4. **Alvarado F.L., Lasseter R.H., Sanchez J.J.** Testing of trapezoidal integration with damping for the solution of power transient problems. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 1983, Vol. PAS-102, No. 12, Pp. 3783–3790.

5. **Adamyan Yu.E., Bocharov Yu.N., Krivosheyev S.I., Kolodkin I.S., Korovkin N.V., Kuligin P.I., Monastyrskiy A.Ye., Titkov V.V.** Zavisimost urovnya perenapryazheniy OPN raznykh klassov napryazheniya ot parametrov zamezlyayushchikh ustroystv. Eksperiment i modelirovaniye [Dependence of overvoltage arrester voltage class on the parameters of the grounding device. Experiment and simulation]. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2016, No. 5-13 (39), Pp. 29–38. (rus)

6. **Kuklin D.V., Selivanov V.N.** Programmnoye

М.: Радио и связь, 1988. 560 с.

12. **Шишигин Д.С.** К выбору технологии интеграции прикладного программного обеспечения с САПР // Труды СПИИРАН. 2016. № 4(47). С. 211–224.

13. **Шишигин Д.С.** AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики // Автоматизация в промышленности. 2014. № 9. С. 28–32.

14. **Гумерова Н.И., Ефимов Б.В., Малочка М.В.** Уточнение рекомендаций по защите высоковольтного оборудования подстанций от грозовых волн // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 3 (22). С. 5–10.

obespecheniye dlya rascheta volnovykh protsessov v zamezlyayushchikh i zamezlyayemykh ob'yektakh [Software for calculations of surge processes in ground conductors and grounded objects]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, Vol. 18, No. 1, Pp. 137–142. (rus)

7. **Shishigin S.L.** Matematicheskiye modeli i metody rascheta zamezlyayushchikh ustroystv. [Mathematical models and methods for grounding devices calculation]. *Elektrichestvo*, 2010, No. 1, Pp. 16–23. (rus)

8. **Korovkin N.V., Shishigin S.L.** Raschetnyye metody v teorii zamezleniya [Calculation methods in the grounding theory]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*, 2013, No. 1(166), Pp. 74–79. (rus)

9. **Khayrer E., Vanner G.** Resheniye obyknovennykh differentsialnykh uravneniy. Zhestkiye i differentsialno-algebraicheskiye zadachi [Solving ordinary differential equations. Stiff and differential-algebraic problems]. Moscow: Mir Publ., 1999, 685 p. (rus)

10. **Verzhitskiy V.M.** Osnovy chislennykh metodov [Basics of numerical methods]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2002, 840 p. (rus)

11. **Vlakh I., Singkhal K.** Mashinnyye metody analiza i proyektirovaniya elektronnykh skhem [Computer methods for circuit analysis and design]. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1988, 560 p. (rus)

12. **Shishigin D.S.** K vyboru tekhnologii integratsii prikladnogo programmnoye obespecheniya s SAPR [On choosing the technology of application software integration with a CAD-system]. *Trudy SPIIRAN*, 2016, No. 4(47), Pp. 211–224. (rus)

13. **Shishigin D.S.** AUTOCAD prilozheniye dlya rascheta molniyezashchity i zamezleniya ob'yektov elektroenergetiki [AutoCAD application for lightning

protection and grounding calculation at power industry objects]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2014, No. 9, Pp. 28–32. (rus)

14. **Gumerova N.I., Yefimov B.V., Malochka M.V.** Utochneniye rekomendatsiy po zashchite

vysokovoltного oborudovaniya podstantsiy ot grozovykh voln [Update recommendations for protection of high voltage equipment from lightning waves]. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, No. 3 (22), Pp. 5–10. (rus)

Received 15.03.2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ШИШИГИН Дмитрий Сергеевич

SHISHIGIN Dmitry S.

E-mail: shishigind@yandex.ru

ШИШИГИН Сергей Леонидович

SHISHIGIN Sergey L.

E-mail: ctod28@yandex.ru

Federated Conference on Computer Science and Information Systems

Prague, Czech Republic
3-6 September, 2017



Events of FedCSIS 2017

■ AIAA'17 - 12th International Symposium Advances in Artificial Intelligence and Applications

- **AIMaVIG'17** - 3rd International Workshop on Artificial Intelligence in Machine Vision and Graphics
- **AIMA'17** - 7th International Workshop on Artificial Intelligence in Medical Applications
- **AIRIM'17** - 2nd International Workshop on AI aspects of Reasoning, Information, and Memory
- **ASIR'17** - 7th International Workshop on Advances in Semantic Information Retrieval
- **LTA'17** - 2nd International Workshop on Language Technologies and Applications
- **WCO'17** - 10th International Workshop on Computational Optimization

■ CSS - Computer Science & Systems

- **AIPC'17** - 2nd International Workshop on Advances in Image Processing and Colorization
- **BigDAISy'17** - 1st Workshop on Big Data Analytics for Information Security
- **CANA'17** - 10th Computer Aspects of Numerical Algorithms
- **CPORA'17** - 2nd Workshop on Constraint Programming and Operation Research Applications
- **C&SS'17** - 4th International Conference on Cryptography and Security Systems
- **MMAP'17** - 10th International Symposium on Multimedia Applications and Processing
- **WSC'17** - 9th Workshop on Scalable Computing
- **WAPL'17** - 6th Workshop on Advances in Programming Languages

■ JAWS - Joint Agent-oriented Workshops in Synergy

- **ABC:MI'17** - 11th Workshop on Agent Based Computing: from Model to Implementation
- **MAS&S'17** - 11th International Workshop on Multi-Agent Systems and Simulations
- **SEN-MAS'17** - 5th International Workshop on Smart Energy Networks & Multi-Agent Systems

■ SSD&A - Software Systems Development & Applications

- **IoT'M'17** - 1st Workshop on Internet of Things, Process Modelling and Microservices
- **IWCPS'17** - 4th International Workshop on Cyber-Physical Systems
- **MIDI'17** - 4th Conference on Multimedia, Interaction, Design and Innovation
- **SEW-37** - The 37th IEEE Software Engineering Workshop
- **LASD'17** - 1st International Conference on Lean and Agile Software Development

■ IT4MBS - Information Technology for Management, Business & Society

- **ABICT'17** - 8th International Workshop on Advances in Business ICT
- **AITM'17** - 115th Conference on Advanced Information Technologies for Management
- **TAMHE'17** - 1st Workshop on Technology Enhanced Medical and Healthcare Education
- **WGSEE'17** - 1st Workshop on Gamification Software for Education and Enterprises
- **ISM'17** - 12th Conference on Information Systems Management
- **IT4L'17** - 5th Workshop on Information Technologies for Logistics
- **KAM'17** - 23rd Conference on Knowledge Acquisition and Management
- **UHH'17** - 3rd International Workshop on Ubiquitous Home Healthcare

■ iNetSApp - International Conference on Innovative Network Systems and Applications

- **CAP-NGNCS'17** - 1st International Workshop on Communications Architectures and Protocols for the New Generation of Networks and Computing Systems
- **INSERT'17** - 1st International Conference on Security, Privacy, and Trust
- **IoT-ECAW'17** - 1st Workshop on Internet of Things - Enablers, Challenges and Applications
- **SoFAST-WS'17** - 6th International Symposium on Frontiers in Network Applications, Network Systems and Web Services
- **WSN'17** - 6th International Conference on Wireless Sensor Networks

■ DS-RAIT'17 - 4th Doctoral Symposium on Recent Advances in Information Technology



www.fedcsis.org
secretariat@fedcsis.org

Important Dates:

Paper submission: **May 10, 2017**

Position paper submission: **May 31, 2017**

Authors notification: **June 14, 2017**

Final paper submission and registration: **June 28, 2017**

Final deadline for discounted fee: **August 01, 2017**

Conference dates: **September 3-6, 2017**

FedCSIS is organized by:



IEEE Xplore®

DIGITAL LIBRARY

Proceedings will be submitted for indexing by:



In cooperation with:



НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»
«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL.
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»

Том 10, № 2, 2017

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Редакция журнала

д-р техн. наук, профессор *А.С. Коротков* – главный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Перевод на английский язык *А.С. Колгатина*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 26.06.2017. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 10,23. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Телекоммуникации. Управление» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19 октября 2012 г. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (ISSN 1994-2354).

Издание с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**. Научные направления журнала учитываются ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

Сведения о публикациях представлены в РИНЦ, в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory».

Периодичность выхода журнала – 4 номера в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Рекомендуемый объем статей для авторов с ученой степенью доктора наук, званием профессора, соискателей ученой степени доктора наук (докторантов) 12–20 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 4.

2. Рекомендуемый объем статей для преподавателей, авторов без ученой степени, соискателей ученой степени кандидата наук – 8–15 страниц формата А-4; аспирантов – 8 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 3.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (0,5–1 стр., актуальность, существующие проблемы); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (0,5–1 стр., предложения, выводы), список литературы (оформление по ГОСТ 7.05.-2008).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул – в редакторе **MathType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт – **TNR**, размер шрифта основного текста – 14, интервал – 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева – 3 см, сверху, снизу – 2,5 см, справа – 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ – 1 см.

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация на русском и английском языках;
- ключевые слова (5–7) на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень, контактные телефоны, e-mail;
- аспиранты представляют документ отдела аспирантуры, заверенный печатью;
- акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет **ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ** по адресу <http://journals.spbstu.ru>

2.3. Рассмотрение материалов

Предоставленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются для рецензирования. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов очной бюджетной формы обучения осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться **ДОСРОЧНО**.

Более подробную информацию можно получить:

на сайте журнала <http://ntv.spbstu.ru>

по телефону редакции +7(812) 552-62-16 с 10⁰⁰ до 18⁰⁰ Галина Александровна

или по e-mail: infocom@spbstu.ru