

# ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского  
государственного  
технического  
университета

ISSN 1990-5297



Серия  
Роботы, мехатроника  
и робототехнические системы

16+

№ 9 (268)

2022

Главный редактор научного журнала  
«Известия Волгоградского государственного технического университета»  
академик РАН, профессор, доктор химических наук,  
президент Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ)  
*И. А. НОВАКОВ*

**Редакционная коллегия:**

*Байбурин В. Б.*, д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАЕН, засл. деятель науки РФ, Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)  
*Безъязычный В. Ф.*, д-р техн. наук, проф., Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск, Россия)  
*Бодров В. Н.*, д-р, проф., Университет прикладных наук (г. Берлин, Германия)  
*Бребельс А.*, PhD, доцент факультета инженерных наук университета г. Левена (г. Левен, Бельгия)  
*Буренин А. А.*, чл.-корр. РАН, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре, Россия)  
*Голованчиков А. Б.*, д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Гринберг Б. А.*, д-р физ.-мат. наук, Институт физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)  
*Гуревич Л. М.*, д-р техн. наук, доц. ВолгГТУ  
*Добрушин Л. Д.*, д-р техн. наук, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев, Украина)  
*Злотин С. Г.*, д-р хим. наук, проф., Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН (г. Москва, Россия)  
*Иванов А. М.*, д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ, г. Москва, Россия)  
*Иващенко Н. А.*, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)  
*Королев А. В.*, д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)  
*Кузьмин С. В.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Кураев А. А.*, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь)  
*Лысак В. И.*, академик РАН, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Марков В. А.*, д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет (МГТУ) им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)  
*Мертен Клеменс*, д-р техн. наук, проф. Universität Stuttgart Institut für Chemische Verfahrenstechnik (г. Штутгарт, Германия)  
*Навроцкий А. В.*, д-р хим. наук, проф. ВолгГТУ  
*Нижегородцев Р. М.*, д-р экон. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (г. Москва, Россия)  
*Пай В. В.*, д-р физ.-мат. наук, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)  
*Пустовойт В. Н.*, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)  
*Русинов В. Л.*, чл.-корр. РАН, Химико-технологический институт Уральского федерального университета (ХТИ УрФУ, г. Екатеринбург, Россия)  
*Рыбин В. В.*, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет (г. Санкт-Петербург, Россия)  
*Трюэль Жан-Луи*, д-р экон. наук, проф., Университет «Париж-12», Сорбонна, Франция, вице-президент Международного клуба экономистов «Круг Кондратьева»  
*Тхай Куанг Винь*, д-р философии, Институт информационных технологий (г. Ханой, Вьетнам)  
*Федянов Е. А.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Фролов В. А.*, д-р техн. наук, проф., МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского (г. Москва, Россия)  
*Шаритов В. М.*, д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет (МАМИ, г. Москва, Россия)  
*Шаховская Л. С.*, д-р экон. наук, проф. ВолгГТУ  
*Щербаков М. В.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ

Серия

«РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА  
И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ  
СИСТЕМЫ»

# ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

*Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней*

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

*Брискин Е. С.*, д.ф.-м.н., проф.

*Горобцов А. С.*, д.т.н., проф.

*Жога В. В.*, д.ф.-м.н., проф.

*Зейдис И.*, PhD, проф.,

Университет Ильменау  
(г. Ильменау, Германия)

*Ермолов И. Л.*, д.т.н., проф. РАН,  
ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН  
(г. Москва)

*Калинин Я. В.*, к.т.н., доцент

*Капустян С. Г.*, д.т.н.,  
ЮФУ (г. Ростов-на-Дону)

*Малолетов А. В.*, д.ф.-м.н.,  
Университет Иннополис  
(г. Иннополис, Республика Татарстан)

*Медведев М. Ю.*, д.т.н., доцент,  
ЮФУ (г. Ростов-на-Дону)

*Несмиянов И. А.*, д.т.н., доцент,  
ВолГТУ (г. Волгоград)

*Пановко Г. Я.*, д.т.н., проф.  
ИМАШ им. А. А. Благонравова  
РАН (г. Москва)

*Ронжин А. Л.*, д.т.н., проф. РАН,  
СПИИРАН (г. Санкт-Петербург)

*Фоменков С. А.*, д.т.н., проф.

*Чернышев В. В.*, д.т.н., проф.

*Шаронов Н. Г.*, к.т.н., доцент

*Юценко А. С.*, д.т.н., проф.,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва)

*Ячун С.Ф.*, д.т.н., проф.,  
ЮЗГУ (г. Курск)

Ответственный секретарь

Вершинина И. П.

Тел.: 8 (8442) 24-81-13

Международный индекс журнала  
ISSN 1990-5297

Журнал распространяется  
по подписке.

Индекс журнала по каталогу  
Агентства «Роспечать»  
для Российской Федерации –  
80811(ОК+ЭК)

**Тел. Издательства ВолГТУ:**

8 (8442) 24-84-05

8 (8442) 24-84-08

zavrio@vstu.ru

Научный журнал  
Издается с января 2004 г.  
Выходит двенадцать раз в год

**№ 9 (268)**  
**Сентябрь**  
**2022**

**УЧРЕДИТЕЛЬ:**

**ФГБОУ высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет»**

**Адрес редакции:**

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.  
Телефон: гл. редактор – (88442) 24-80-00

**E-mail:** president@vstu.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

**Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителю,  
на отдельные статьи – сохраняется за автором**

*Перепечатка из журнала «Известия Волгоградского государственного технического  
университета» категорически запрещена без оформления договора  
в соответствии с действующим законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Известия Волгоградского  
государственного технического университета» обязательна*

© Волгоградский государственный технический университет,

«Известия Волгоградского государственного технического университета», 2022

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:

**Novakov I. A.** – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, President of VSTU

### **Editorial board:**

*Baiburin V. B.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

*Bezyazychny V. F.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov (Rybinsk, Russia)

*Bodrov V. N.*, D. Sc., Prof., University of Applied Sciences (Berlin, Germany)

*Brebels A.*, PhD, Associate Prof., Faculty of Engineering Science of University of Leuven (Leuven, Belgium)

*Burenin A. A.*, Corresponding Member of RAS, Institute of Machinery and Metallurgy of the FEB RAS (Komsomolsk-on-Amur, Russia)

*Golovanchikov A. B.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Grinberg B. A.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Institute of Metal Physics, Ural Division of RAS (Ekaterinburg, Russia)

*Gurevich L. M.*, D. Sc. (Engineering), Associate Prof. of VSTU

*Dobrushin L. D.*, D. Sc. (Engineering), E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)

*Zlotin S. G.*, D. Sc. (Chemistry), Prof., N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

*Ivanov A. M.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow Automobile and Road Construction University (MADI) (Moscow, Russia)

*Ivashchenko N. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

*Korolev A. V.*, D. Sc., Prof., State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

*Kuzmin S.V.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Kurayev A. A.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR) (Minsk, Republic of Belarus)

*Lysak V. I.*, Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Markov V. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

*Merten K.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Institute of Chemical Process Engineering (Stuttgart, Germany)

*Navrotskiy A. V.*, D. Sc. (Chemistry), Prof. of VSTU

*Nizhegorodtsev R. M.*, D. Sc. (Economy), Chief research worker, Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences (Moscow, Russia)

*Pai V. V.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)

*Pustovoit V. N.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

*Rusinov V. L.*, Corresponding Member of RAS, Institute of Chemical Technology of Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)

*Rybin V. V.*, Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., St. Petersburg Polytechnic University (St.Petersburg, Russia)

*Thai Quang Vinh*, D. Sc. (Philosophy), Institute of Information Technology (Hanoi, Vietnam)

*Truel J.-L.*, D. Sc. (Economy), Prof., University Paris Est Créteil, Sorbonne, France, Vice-president of International economists club “Kondratiev Circle”

*Fedyanov E. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Frolov V.A.*, D. Sc. (Engineering), Prof., “MATI Russian State Technological University named after K. E. Tsiolkovsky” (Moscow, Russia)

*Sharipov V. M.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow State Technical University “MAMI” (Moscow, Russia)

*Shakhovskaya L. S.*, D. Sc. (Economy), Prof. of VSTU

*Shcherbakov M. V.*, D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU

SERIES "ROBOTS,  
MECHATRONICS  
AND ROBOTIC SYSTEMS"

# IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL  
UNIVERSITY

*The Journal is included to the list of peer-reviewed scientific journals and publications of the Higher Attestation Commission (HAC) of the RF for publishing of results of candidates for scientific degrees*

## Editorial board:

Chairman

**Briskin E. S.**, D. Sc. (Physical and Mathematical), Prof.

**Gorobtsov A. S.**, D. Sc. (Engineering), Prof.

**Zhoga V. V.**, D. Sc. (Physical and Mathematical), Prof.

**Zejdís I.**, PhD, Prof., Ilmenau University (Ilmenau, Germany)

**Ermolov I. L.**, D. Sc. (Engineering), Prof. RAS IPMechRAS (Moscow)

**Kalinin Ya. V.**, Cand. Sc. (Engineering), Assoc. Prof.

**Kapustyan S. G.**, D. Sc. (Engineering), SFEDU (Rostov-on-Don)

**Maloletov A. V.**, D. Sc. (Physical and Mathematical), Innopolis University (Innopolis, Republic of Tatarstan)

**Medvedev M. Yu.**, D. Sc. (Engineering), Assoc. Prof., SFEDU (Rostov-on-Don)

**Nesmiyanov I. A.**, D. Sc. (Engineering), Assoc. Prof., Volgograd SAU (Volgograd)

**Panovko G. Ya.**, D. Sc. (Engineering), Prof., Mechanical Engineering Research Institute of the RAS (Moscow)

**Ronzhin A. L.**, D. Sc. (Engineering), Prof. RAS, SPIIRAS (St. Petersburg)

**Fomenkov S. A.**, D. Sc. (Engineering), Prof.

**Chernyshev V. V.**, D. Sc. (Engineering), Prof.

**Sharonov N. G.**, Cand. Sc. (Engineering), Assoc. Prof.

**Yuschenko A. S.**, D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman MSTU (Moscow)

**Yatsun S. F.**, D. Sc. (Engineering), Prof., SWSU (Kursk)

Executive secretary

Vershinina I.P.

Tel.: 8 (8442) 24-81-13

International index of the journal  
ISSN 1990-5297

The journal is distributed by subscription.  
Index of the journal in the catalogue of the Agency "Rospechat" for the Russian Federation – 80811(OK+ЭK).

**Tel. Of VSTU editorial office:**

8 (8442) 24-84-05

8 (8442) 24-84-08

zavrio@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

**№ 9 (268)**  
**September**  
**2022**

**FOUNDER:**  
**FSBEI of Higher Education**  
**"Volgograd State Technical University"**

**Editorial office address:**  
Volgograd, Lenin avenue, 28.  
Tel.: Head Editor – +7(8442) 24-80-00  
**E-mail:** president@vstu.ru

The journal is registered at the Federal Service on Control in the Sphere of Communication, IT and Mass Communications (Roscomnadzor)

Registration certificate ПИ № ФС77–61113 of March 19, 2015

Is printed according to the decision of editorial-review board of  
Volgograd State Technical University

*The copyright for the journal in general belongs to the Founder,  
for separate articles – to authors.*

*Reprint from the journal "Izvestia VSTU" is strongly forbidden without conclusion of an agreement in accordance with the legislation of the RF  
When reprinting the materials, the citation to the journal "Izvestia VSTU" is obligatory*

© Volgograd State Technical University,  
"Izvestia VSTU", 2022

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| Ажгалиев Р. С. 19     | Кацурин А. А. 79       |
| Артемьев П. С. 28     | Климчик А. С. 62       |
| Бабоченко Н. В. 6     | Коноплин А. Ю. 79      |
| Брискин Е. С. 75, 86  | Леонард А. В. 34, 42   |
| Буличев О. В. 12      | Малолетов А. В. 12, 56 |
| Бурмистенко М. С. 24  | Марков А. Е. 24, 48    |
| Воробьева Н. С. 19    | Марчук Е. А. 56        |
| Горобцов А. С. 24, 48 | Останин М. А. 62       |
| Гулевский В. В. 66    | Пеньшин И. С. 66       |
| Дианский А. В. 24, 48 | Прокудин Г. Ю. 28      |
| Дяшкин А. В. 19       | Смирная Л. Д. 75       |
| Дяшкин-Титов В. В. 19 | Тарасов П. С. 24, 48   |
| Ефимов М. И. 28       | Филаретов В. Ф. 79     |
| Иванов М. А. 56       | Хачатрян А. А. 86      |
| Калинин Я. В. 56      | Шаронов Н. Г. 66       |

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

<i>Бабоченко Н. В.</i> Кинематическая модель роботизированной шарнирно-стержневой стрелы.....	6
<i>Буличев О. В., Малолетов А. В.</i> Метод оптимизации количества ног шагающего робота на основе эволюционного алгоритма.....	12
<i>Воробьева Н. С., Дяшкин А. В., Ажгалиев Р. С., Дяшкин-Титов В. В.</i> Обоснование конструктивного исполнения роботизированного устройства для возделывания бахчевых культур под пленкой.....	19
<i>Горбцов А. С., Марков А. Е., Тарасов П. С., Дианский А. В., Бурмистенко М. С.</i> Программная среда отладки программ для электронных блоков управления машин.....	24
<i>Ефимов М. И., Артемьев П. С., Прокудин Г. Ю.</i> Экспериментальное исследование движения тросового робота по ровной вертикальной поверхности.....	28
<i>Леонард А. В.</i> Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ( $VC/APF+BC_{\tau}^1$ ). Ч. I. Теория.....	34
<i>Леонард А. В.</i> Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ( $VC/APF+BC_{\tau}^1$ ). Ч. II. Результаты.....	42
<i>Марков А. Е., Тарасов П. С., Дианский А. В., Горбцов А. С.</i> Анализ точности SLAM алгоритмов на мобильной платформе.....	48
<i>Марчук Е. А., Калинин Я. В., Иванов М. А., Малолетов А. В.</i> О выборе математических моделей висячих элементов при проектировании крупногабаритного параллельного тросового робота.....	56
<i>Останин М. А., Климчик А. С.</i> Архитектура системы взаимодействия человек-робот на основе смешанной реальности.....	62
<i>Пеньшин И. С., Гулевский В. В., Шаронов Н. Г.</i> Результаты экспериментальных исследований движения мобильных подводных роботов с якорно-тросовыми и якорно-тросово-гусеничными движителями.....	66
<i>Смирная Л. Д., Брискин Е. С.</i> О построении уравнений движения шагающих движителей мобильных роботов в фазе переноса.....	75
<i>Филаретов В. Ф., Кацурин А. А., Коноплин А. Ю.</i> Система согласованного полуавтоматического телеуправления двумя мобильными роботами.....	79
<i>Хачатрян А. А., Брискин Е. С.</i> О перемещении мобильного робота по произвольно ориентированным поверхностям.....	86
К сведению авторов.....	95

*Н. В. Бабоченко*

## **КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВОЙ СТРЕЛЫ**

**Волгоградский государственный аграрный университет**

*nat-krivelskaya@mail.ru*

Рассматривается кинематическая модель роботизированной шарнирно-стержневой стрелы. Представлен действующий образец роботизированной шарнирно-стержневой стрелы. Роботизированная шарнирно-стержневая стрела обладает определенными конструктивными особенностями. Принцип работы роботизированной шарнирно-стержневой стрелы отличен от подобных ей конструкций. Кинематическая модель представлена в виде матричных взаимозависимостей. Рассматривая матричные взаимозависимости, возможно выявить оптимальные рабочие характеристики и углы поворота роботизированной шарнирно-стержневой стрелы. По полученным численным значениям в дальнейшем становится реальным построение графических зависимостей и зоны действия роботизированной шарнирно-стержневой стрелы.

*Ключевые слова:* конструкция роботизированной шарнирно-стержневой стрелы, график, матричное уравнение, кинематическая модель, блок-схема.

*N. V. Babochenko*

## **KINEMATIC MODEL OF A ROBOTIC HINGED-ROD BOOM**

**Volgograd State Agrarian University**

A kinematic model of a robotic articulated boom is considered. A working prototype of a robotic articulated boom is presented. The robotic articulated boom has certain design features. The principle of operation of a robotic articulated boom is different from similar designs. The kinematic model is presented in the form of matrix interdependencies. Considering the matrix interdependencies, it is possible to identify the optimal performance and rotation angles of the robotic articulated boom. Based on the obtained numerical values, the construction of graphical dependencies and the area of action of the robotic articulated boom becomes real in the future.

*Keywords:* design of a robotic articulated boom, graph, matrix equation, kinematic model, block diagram.

### **Введение**

В настоящее время существует большое разнообразие роботизированных систем. Область применения таких систем различна [1–8; 10–13]. Однако остается малоизученным вопрос применения роботизированных шарнирно-стержневых систем. Проблема, которая возникла в процессе исследования роботизированных шарнирно-стержневых систем, заключается, в частности, в раскрытии кинематики. Проблема исследования как раз и заключается в создании кинематической модели конкретно взятой роботизированной системы – роботизирован-

ной шарнирно-стержневой стрелы. Актуальность работы заключается в том, чтобы раскрыть путем составления матричных взаимозависимостей кинематические возможности роботизированной шарнирно-стержневой стрелы. Шарнирно-стержневые стрелы в конструкции подъемно-транспортных машин встречаются довольно редко; распространены жесткие соединения стержней, образующих в совокупности геометрически неизменяемую систему, называемую фермой. Предлагаем рассмотреть возможности роботизированной шарнирно-стержневой стрелы (рис. 1).



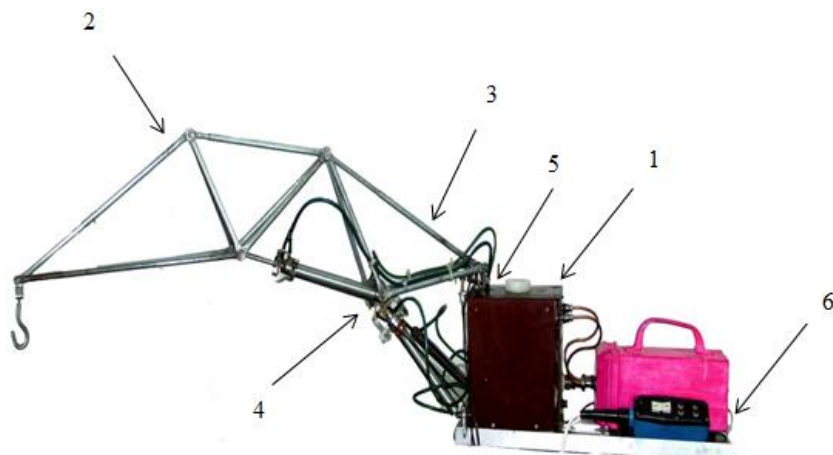


Рис. 1. Экспериментальный образец роботизированной шарнирно-стержневой стрелы

Экспериментальный образец роботизированной шарнирно-стержневой стрелы (рис. 1) действующий и включает смонтированный на небольшом остова гидросиловой блок (1), в корпусе которого размещены электродвигатель с насосом, бак для рабочей жидкости и другие устройства. Гидросиловой блок (1) связан с конструкцией шарнирно-стержневой стрелы (2), на конце которой размещен грузонесущий орган – крюк. Стрелу (2) возможно разделить на составляющие, выделив корневую треугольную секцию (3), на вершине одного из углов которой размещен специальный трехходовой шарнирный узел (4). Один из острых углов корневой секции (4) с помощью роликового опорно-поворотного устройства (5) закреплен на указанном блоке (1), а другой острый угол соединен со следующей составляющей стрелы (2) рукоятью, которая набрана из шарнирных треугольников с одной общей стороной.

При таком взаимном расположении стержней и силовых гидроцилиндров, входящих в состав роботизированной шарнирно-стержневой стрелы (рис. 1), происходит восприятие нагрузок растяжения (сжатия) всеми стержнями, составляющими треугольные соединения стрелы. Благодаря такому исполнению стрела имеет незначительные массу и подветренную площадь. Верхние стержни способны изменять свою длину; тем самым происходит регулирование зоны действия роботизированной шарнирно-стержневой стрелы. Расположенные под углом друг к другу силовые гидроцилиндры способны разворачивать стрелу на заданные углы. И это возможно осуществить, избежав применения в конструкции традиционного поворотного круга или иного механизма поворота. В местах соединения стержней конструкции предусмот-

рены подвижные шарнирные соединения, которые обеспечивают достаточную подвижность звеньев, составляющих роботизированную шарнирно-стержневую стрелу.

Привод и система управления роботизированной шарнирно-стержневой стрелы, кстати сказать, содержат в себе малогабаритную и простую тиристорную схему для бесступенчатого регулирования частоты вращения электродвигателя и электроуправляемые клапаны для регулировки работы гидроцилиндров. Сами клапаны, как и электрическая схема управления, сконцентрированы в одном блоке (1), а управление работой стрелы осуществляется от внешнего электрического пульта (6).

Роботизированная шарнирно-стержневая стрела рассчитана на определенное значение нагрузки (в частности, до 0,5 т), а экспериментальный образец, представленный на рис. 1, рассчитан на нагрузку до 20 кг. Рассматриваемую роботизированную шарнирно-стержневую стрелу в случае серийного производства возможно разместить на электротележке (электрокаре), вилочном электропогрузчике или ходовой тележке на электроприводе. Действие роботизированной шарнирно-стержневой стрелы сопровождается изменением скорости хода штоков гидроцилиндров, что, в свою очередь, достигается изменением производительности насоса; при этом начальным регулятором данного процесса служит изменение частоты электродвигателя. С этой целью задействован коллекторный электродвигатель переменного тока, который исполнен с последовательным возбуждением и отсутствием стабилизированной частоты вращения.

В данном случае бесступенчатое регулирование скорости перемещения стрелы при вы-

полнении рабочих операций способствует безопасности и высокой точности позиционирования. Между прочим, при наличии специальной транспортно-энергетической базы и структурных особенностей описываемой стрелы, а также с учетом возможностей привода, вероятно использование передвижной роботизированной шарнирно-стержневой стрелы в качестве высокоманевренного средства, способного работать в ограниченных условиях.

### Структура кинематической модели роботизированной шарнирно-стержневой стрелы

Учитывая заданные размеры роботизированной шарнирно-стержневой стрелы, имеем обобщенные координаты системы с тремя степенями свободы – углы  $\varphi$ ,  $\psi$  и  $\theta$ ,  $\tau$  поворота основных секций стрелы, которые выражаются из функции длины силовых гидроцилиндров  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_{3,4}$ . При этом имеем в виду, что значения размеров расстояний  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и длин силовых гидроцилиндров  $l_1$  и  $l_2$  конструкции стрелы подвергнутся известному изменению.

Принимая систему координат (рис. 2) и используя ее, составим матричное уравнение для выявления цепочки взаимозависимостей согласно представленной кинематической схеме.

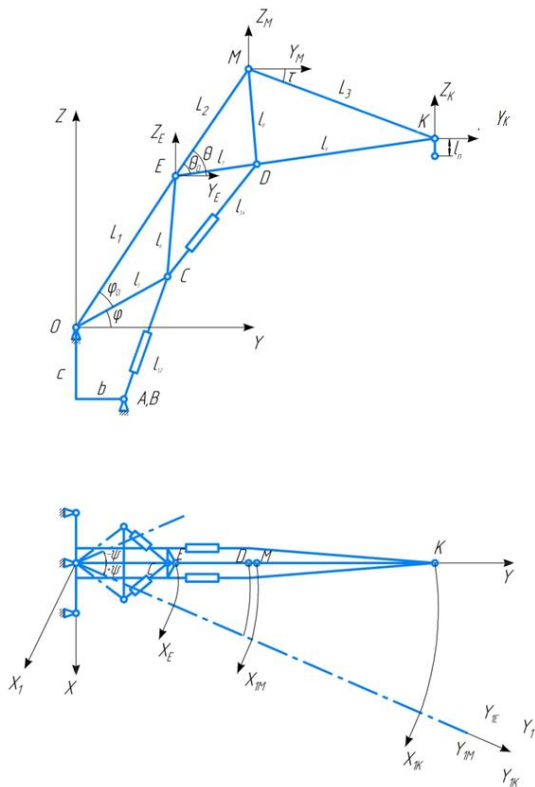


Рис. 2. Кинематическая схема роботизированной шарнирно-стержневой стрелы

Созданная [9] в дальнейшем компьютеризированная программа для выявления кинематических характеристик роботизированной шарнирно-стержневой стрелы (рис. 1) базируется на используемом методе преобразования координат, суть которого и подлежит рассмотрению.

Так, координаты оголовка  $K$  стрелы ( $X_K$ ,  $Y_K$ ,  $Z_K$ ) параллельным переносом вдоль отрезка  $MK$  на расстояние  $L_3$  перенесем в систему  $MX_M Y_M Z_M$ . Запишем этот переход в форме матричной взаимозависимости:

$$A = \begin{pmatrix} 0 \\ L_3 \cos \tau \\ L_2 \sin \tau \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Само матричное уравнение перехода имеет вид:

$$X_M = X_K + A, \quad (2)$$

где  $X_M$ ,  $X_k$  – столбцы координат точки  $K$  в системах координат  $MX_M Y_M Z_M$  и  $KX_K Y_K Z_K$  соответственно.

В виде матричной взаимозависимости запишем параллельный перенос системы координат  $MX_M Y_M Z_M$  в систему  $EX_E Y_E Z_E$  вдоль отрезка  $EM$  на расстояние  $L_2$ :

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ L_2 \cos \theta \\ L_2 \sin \theta \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Получили следующее матричное уравнение перехода в виде:

$$X_E = X_M + B = X_K + A + B. \quad (4)$$

Систему координат  $OXYZ$  получаем параллельным переносом системы координат  $EX_E Y_E Z_E$  вдоль отрезка  $OE$  на расстояние  $L_1$ .

Матричная взаимозависимость примет вид:

$$C = \begin{pmatrix} 0 \\ L_1 \cos (\varphi + \varphi_0) \\ L_2 \sin (\varphi + \varphi_0) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Выполним поворот вокруг оси  $OZ$  на угол  $\psi$ , совмещая систему координат  $OXYZ$  с принятой за базовую систему  $OXYZ$ .

Осуществленные преобразования возможно представить в виде следующей матричной взаимозависимости:

$$M = \begin{pmatrix} \cos \psi - \sin \psi \\ \sin \psi \cos \psi \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Матричное уравнение перехода цепочки взаимозависимостей для всей роботизированной шарнирно-стержневой стрелы примет вид:

$$X = [X_K + A + B + C] \cdot M, \quad (7)$$

где  $X_K$  – столбцы координат точки  $K$ , а  $M$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – матрицы преобразований.

Взаимосвязь между координатами точек  $O (X_O, Y_O, Z_O)$  и  $K (X_K, Y_K, Z_K)$  возможно показать в виде:

$$\begin{aligned} X_0 &= L_1 \cdot \cos \varphi \sin \psi + X_K \cdot \cos \psi - \\ &- (L_2 + L_3 + Y_K) \cdot \cos(\theta - \theta_0 + \tau - \varphi - \varphi_0) \cdot \sin \psi - \\ &- Z_K \cdot \sin(\theta + \tau - \varphi - \varphi_0) \cdot \sin \psi; \\ Y_0 &= L_1 \cdot \cos \varphi \cos \psi + X_K \cdot \sin \psi - \\ &- (L_2 + L_3 + Y_K) \cdot \cos(\theta + \tau - \varphi - \varphi_0) \cdot \cos \psi - \\ &- Z_K \cdot \sin(\theta + \tau - \varphi - \varphi_0) \cdot \cos \psi; \\ Z_0 &= L_1 \cdot \sin \varphi - (L_2 + L_3 + Y_K) \cdot \sin(\theta + \tau - \varphi - \varphi_0) - \\ &- Z_K \cdot \sin(\theta + \tau - \varphi - \varphi_0). \end{aligned} \quad (8)$$

Введенные формулы перехода от сферической системы координат к прямоугольной системе позволят представить координаты оголов-

ка  $K$  роботизированной шарнирно-стержневой стрелы в неподвижной системе отсчета  $OXYZ$  через углы  $\varphi$  и  $\psi$ :

$$\begin{aligned} X_K &= L_1 \cdot \cos(\varphi + \varphi_0) + L_2 \cdot \cos(\theta - \theta_0 + \varphi + \varphi_0) + \\ &+ L_3 \cdot \cos(\theta - \theta_0 + \tau_0 - \tau + \varphi + \varphi_0) \cdot \sin \psi; \\ Y_K &= L_1 \cdot \cos(\varphi + \varphi_0) + L_2 \cdot \cos(\theta - \theta_0 + \varphi + \varphi_0) + \\ &+ L_3 \cdot \cos(\theta - \theta_0 + \tau - \tau_0 + \varphi + \varphi_0) \cdot \cos \psi; \\ Z_K &= L_1 \cdot \sin(\varphi + \varphi_0) + L_2 \cdot \sin(\theta - \theta_0 + \varphi + \varphi_0) + \\ &+ L_3 \cdot \sin(\theta - \theta_0 + \tau - \tau_0 + \varphi + \varphi_0). \end{aligned} \quad (9)$$

Полученные зависимости (7), (8) и (9) говорят о том, что матричный метод преобразования координат применительно к роботизированной шарнирно-стержневой стреле упрощает процесс определения координат шарниров, составляющих кинематическую цепочку взаимозависимостей.

С учетом представленной методики матричных уравнений возможно определение координат шарниров, составляющих роботизированную шарнирно-стержневую стрелу [5, 6, 7, 8, 10]. Данная методика направлена на выявление кинематических возможностей роботизированной шарнирно-стержневой стрелы.

Для решения представленных выражений (1)–(9) с помощью ЭВМ ввели систему обозначений и правил для записи алгоритмов, исполняемых на компьютере, и получили блок-схему кинематической цепочки взаимозависимостей для всей роботизированной шарнирно-стержневой стрелы (рис. 3) согласно представленной выше формуле (7).

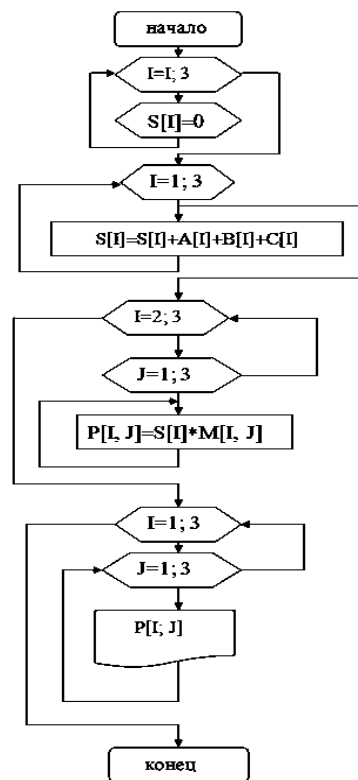


Рис. 3. Блок-схема кинематической цепочки взаимозависимостей

### Результаты

Предложенные к использованию матричные уравнения для определения кинематических параметров роботизированной шарнирно-стержневой стрелы (рис. 1) значительно упрощают математические расчеты. Изменением размеров силовых гидроцилиндров возможно выявить оптимальные значения: а) работы силовых гид-

роцилиндров; б) расстояний между опорами силовых гидроцилиндров ( $AB$ ); в) длин стержней, составляющих треугольные соединения конструкции роботизированной шарнирно-стержневой стрелы; г) углов поворота стрелы в горизонтальной и вертикальной плоскостях ( $\psi$ ,  $\varphi$ ).

Затем, для наглядности происходящих изменений, строятся графики (рис. 4, 5).

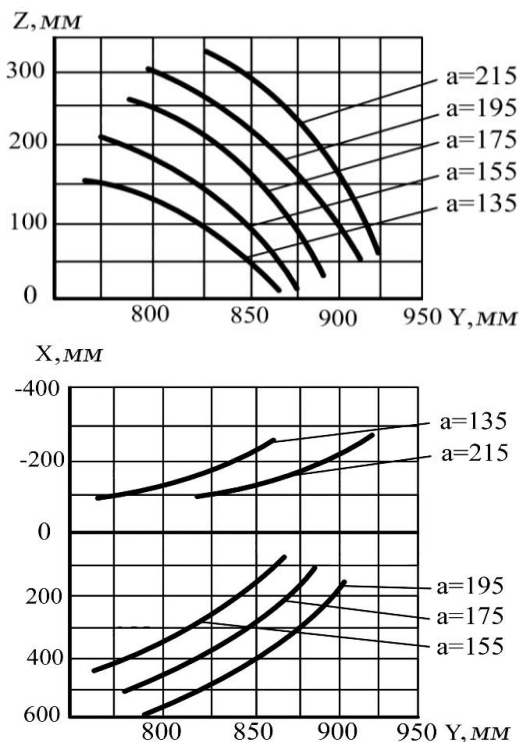


Рис. 4. Графики определения оптимального расстояния  $a$  между опорами силовых гидроцилиндров ( $AB$ ) роботизированной стрелы

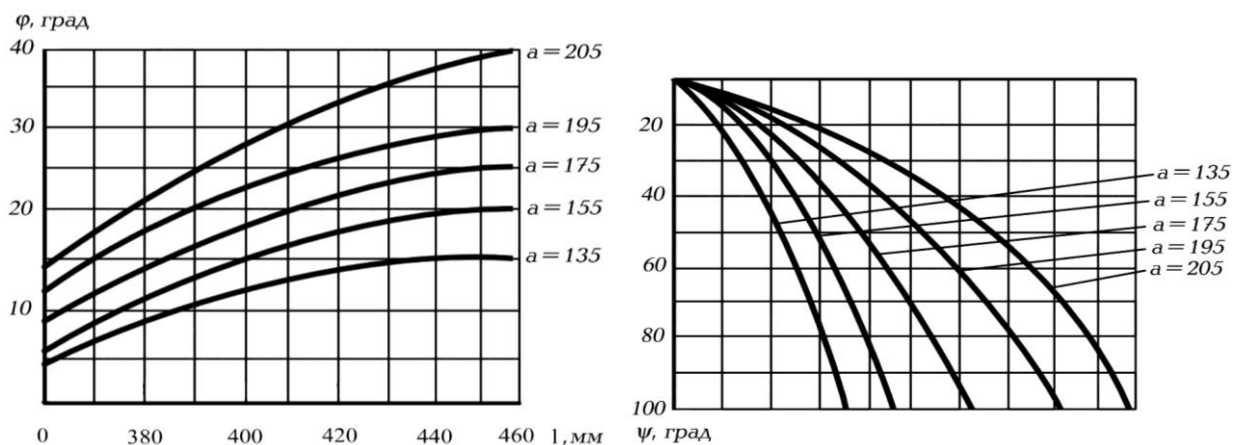


Рис. 5. Графики определения углов поворота роботизированной стрелы в горизонтальной и вертикальной плоскостях ( $\psi$ ,  $\varphi$ ) при оптимальных значениях величин

Приведенная кинематическая модель роботизированной шарнирно-стержневой стрелы

показывает соответствие кинематических параметров, таких как траектории точек и пере-

мещение по заданным условиям. По полученным значениям координат перемещения шарниров, составляющих треугольники роботизированной шарнирно-стержневой стрелы, возможно построение зоны действия (рис. 6).

роvanной шарнирно-стержневой стрелы, возможно построение зоны действия (рис. 6).

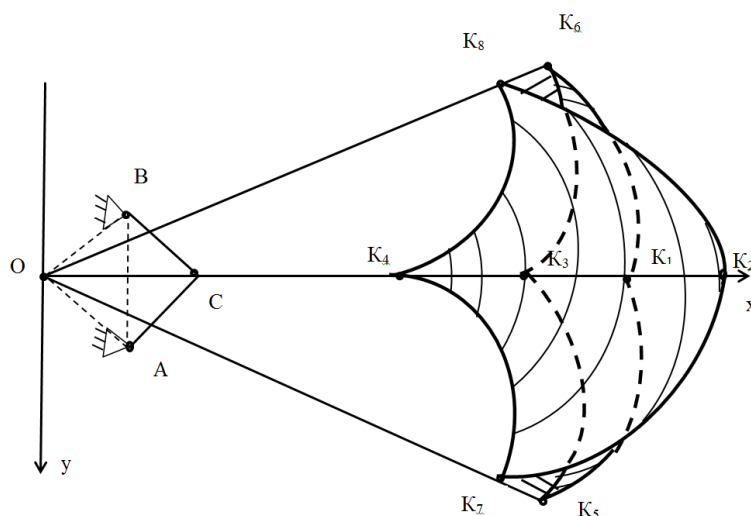


Рис. 6. Зона действия роботизированной стрелы

**Заключение**

Приведенная в статье кинематическая модель роботизированной шарнирно-стержневой стрелы, в форме решения матричных уравнений применительно к описанной конструкции, раскрывает возможности определения оптимальных рабочих характеристик и углов поворота в процессе варьирования заданных размеров расстояний  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и длин силовых гидроцилиндров  $l_1$  и  $l_2$ . В дальнейшем полученные характеристики востребованы в расчетах сил инерции и моментов сил инерции, кинетической энергии и мощности.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Ватулин, Я. С. Численное моделирование предельных состояний стреловых самоходных кранов / Я. С. Ватулин, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 4 (697). – С. 19–27.
2. Григорьев, П. А. Патентный анализ современных технических решений для обеспечения устойчивости крановых конструкций / П. А. Григорьев, Л. А. Сладкова // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 7. – С. 38–42.
3. Лагерев, И. А. Предпроектная оптимизация манипуляционной системы с гидравлическим приводом мобильной транспортно-технологической машины / И. А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – № 1. – С. 26–45.
4. Мехонин, О. Н. Использование крано-манипуляторных установок на шасси малотоннажных грузовых автомобилей / О. Н. Мехонин, К. Г. Пугин, Р. В. Щеткин // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2019. – Т. 1. – С. 85–88.

5. Остриков, И. А. Компьютерное моделирование работы стрелового гидроманипулятора / И. А. Остриков // Наука и молодежь: новые идеи и решения. Материалы XIV Международной научно-практической конференции молодых исследователей : сб. тр. конф. Ч. 5. ВОЛГАУ. – Волгоград, 2020. – С. 239–241.
6. Папа, Антви-Вилсон. Моделирование кинематики работы шарнирно-стержневого гидроманипулятора / Папа Антви-Вилсон // Нива Поволжья. – 2020. – № 1 (54). – С. 127–137.
7. Пат. № 2178382 РФ. Стрела грузоподъемного средства / В. И. Пындак, Н. В. Кривельская. – Опулб. 2002. – Бюл. № 2. – 8 с.
8. Пат. РФ на полезную модель № 145959. Стрела грузоподъемного средства / Н. В. Бабоченко. – Опулб. 23.05.14. – 8 с.
9. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017614539. Pivotal Manipullator-3D – определение координат для графических построений шарнирно-стержневого гидроманипулятора с пространственным приводным механизмом / Н. В. Бабоченко – Опулб. 09.01.2017. – 11 с.
10. Фисенко, В. С. Программа для определения координат и углов поворотов стрелы робота манипулятора / В. С. Фисенко // Лабиринты науки : Материалы I Региональной научно-практической конференции старшекласников и студентов СПО : сб. тр. конф. ВОЛГАУ. – Волгоград, 2018. – С. 22–24.
11. Zhang, T. Position Force Control for a Single Leg of a Quadruped Robot in an Operation Space / T. Zhang, Q. Wei, H. Ma // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10.
12. ISO 8686-2:2018(en) Cranes – Design principles for loads and load combinations – Part 2: Mobile cranes. (ИСО 8686-2:2018 «Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Ч. 2. Краны стреловые самоходные»). – 2018. – 18 р.
13. Geisler, T. Free vibration analysis of a DST-0285 truck crane considering changes in the system load configuration / T. Geisler // MATEC Web of Conference. – 2018. – V. 157. – P. 1–12.

УДК 621.8:62-5

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-12-19

*О. В. Буличев<sup>1</sup>, А. В. Малолетов<sup>1,2</sup>***МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ КОЛИЧЕСТВА НОГ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА  
НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО АЛГОРИТМА\***<sup>1</sup> Университет Иннополис<sup>2</sup> Волгоградский государственный технический университет

{o.bulichev, a.maloletov}@innopolis.ru

Многоногие шагающие роботы на базе цикловых движителей с одной степенью свободы могут быть использованы для ряда приложений, включая поиск и спасение в разрушенных завалах, исследование пещер. Пространство возможных решений для проектирования таких роботов довольно велико. Возможно оптимизировать форму ноги, корпуса, конфигурации компонентов. Часть из критериев качества возможно вычислить аналитически, а определение других критериев требует физических или численных экспериментов. В работе представлен метод оптимизации количества ног робота с использованием симулятора Gazebo для реализации динамической модели робота и генетического алгоритма оптимизации. По результатам решения задачи структурного синтеза выявлена зависимость между количеством ног и проходимостью робототехнической платформы.

*Ключевые слова:* цикловой движитель, шагающий робот, многоногий робот, оптимизация, эволюционное исчисление, генетический алгоритм.

*O. V. Bulichev<sup>1</sup>, A. V. Maloletov<sup>1,2</sup>***OPTIMIZING THE NUMBER OF LEGS OF A WALKING ROBOT  
BASED ON EVOLUTIONARY ALGORITHM**<sup>1</sup> Innopolis University<sup>2</sup> Volgograd State Technical University

Multi-legged walking robots with cyclic motors with one degree of freedom can be used for a number of applications, including search and rescue in collapsed rubble, cave exploration. The range of possible solutions for designing such robots is quite large. It is possible to optimize the shape of the leg, the body, and component configurations. Some of the criteria can be found analytically, and some require physical or numerical experiments. This paper presents a method for optimizing the number of robot legs, using the Gazebo simulator to implement a dynamic robot model and a genetic optimization algorithm. Based on the results of solving the structural synthesis problem, the dependence between the number of legs and the walkability of the robotic platform is revealed.

*Keywords:* cyclic walking mechanism, walking machines, multi-legged robots, optimization, evolutionary calculus, genetic algorithm.

**Введение**

Проектирование мобильного шагающего робота – это комплексная задача, которая обычно делится на множество подзадач, часто остающихся взаимосвязанными. Одной из них является подбор движителя.

У каждого движителя есть свой набор параметров, влияющих на проходимость робота, связанных с характеристиками тела. У шагающих роботов таковыми являются габариты, количество и тип ног. Эти конструктивные параметры определяют эффективность работы робота, в частности, энергозатраты на его движение и его способность проходить через различные типы пересеченной местности. Подбор

таких конструктивных параметров называют задачей структурного синтеза.

Поскольку показатели эффективности противоречат друг другу, проблема выбора параметров конструкции по своей сути предполагает компромисс. Например, размеры корпуса стараются минимизировать, поскольку это снижает массу корпуса, стоимость материала, количество и размеры механизмов шагания, энергозатраты на перемещение, улучшает возможность перемещения в узких проходах. С другой стороны, увеличение размеров корпуса и движителей таких роботов может дать больше преимуществ, поскольку это положительно влияет на грузоподъемность и проходи-

© Буличев О. В., Малолетов А. В., 2022.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90265. The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90265.

мость робота по пересеченной местности. При этом некоторые параметры, такие как размеры робота, являются непрерывными, в то время как другие параметры, например количество ног, могут принимать только целочисленные значения.

Таким образом, задача структурного синтеза сводится к дискретной многокритериальной задаче оптимизации, вектор критериев качества в которой включает в себя как критерии, вычисляемые на основе заданных параметров, так и критерии, для определения которых необходимо провести физический или численный эксперимент. Примером вычисляемого критерия является минимально допустимая длина корпуса, которая ограничивается количеством и размерами размещенных на корпусе ног. Примером критерия второго рода является путь, который робот проходит за заданное время по пересеченной местности.

Путь, который робот проходит по пересеченной местности, зависит от характеристик опорной поверхности и большого количества внутренних факторов. Путь можно вычислить на основе динамической модели робота, вы-

полнив численный эксперимент, или в результате физического эксперимента на реальной модели робота.

В работе исследуется динамическая модель многоногого шагающего робота с цикловыми движителями [1], работающими синхронно в пределах каждого из бортов робота. Подобные роботы достаточно популярны [2–8] благодаря исключительной простоте шагающего движителя, который представляет собой одно твердое тело, вращающееся относительно корпуса. В табл. 1 приведены их основные параметры, на основе которых задавались стартовые параметры модели в данном исследовании.

Динамическая модель реализована в симуляторе Gazebo. В рамках симуляции робот движется по различным случайным образом сгенерированным поверхностям. Вектор критериев качества включает в себя проходимый роботом путь и величину, обратную длине корпуса. Варьируемыми параметрами робота являются количество цикловых движителей и разности фаз между соседними движителями. Для решения оптимизационной задачи используется генетический алгоритм.

Таблица 1

Сравнение параметров роботов с цикловыми движителями

Параметры	RHex	TurboQuad	Whigs II	Gakken Mechamo Centipede	Серфер
Длина, мм	540	320	600	470	820
Ширина, мм	200	140	190	360	250
Высота, мм	127	100	140	50	45
Масса, кг	8.2	1.1	8.6	3.86	3
Количество ног	6	32	4	18	74
Высота ноги, мм	175	50	175	100	90
Масса ноги, кг	0.1	0.02	0.38	0.05	0.03
Скорость, м/с	1.6	0.1	2	1.5	1

### Моделирование рельефа

Известны следующие подходы к оценке рельефа:

1. Анализ множества физических свойств поверхностей, таких как почва или камни, с точки зрения максимальной скорости, мощности и других параметров робота при их прохождении [2, 9].

2. Построение конкретной местности, которая является достаточно сложной в субъектив-

ном плане. Такой подход использовался, например, в задании Rough Terrain Task в DARPA's Virtual Robotics Challenge и для тестирования робота ATLAS [10].

3. Оценка местности в соответствии с возможностями робота, основывающаяся на максимальном перепаде высот, который может преодолеть робот. Если робот не может его преодолеть, значит, местность неудовлетворительная [11, 12] (рис. 1).

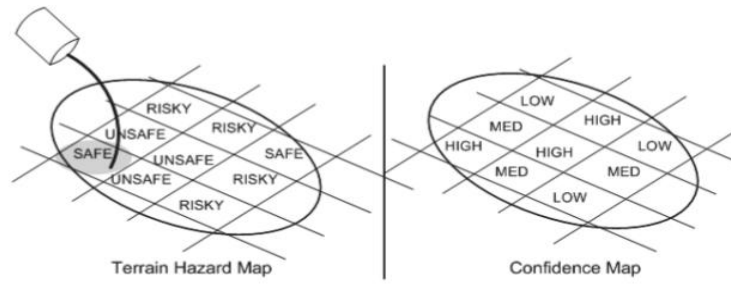


Рис. 1. Пример карт местности: карта опасности местности и карта достоверности местности

4. Оценка по карте с использованием ряда анализируемых параметров, таких как дисперсия, дальность, тип почвенно-растительного покрова, количество острых граней и так далее [11].

5. Генерация искусственных поверхностей. Пример генерации жесткой поверхности с квадратной сеткой, где каждая ячейка имеет некоторую высоту, показан в работе [13] (рис. 2).

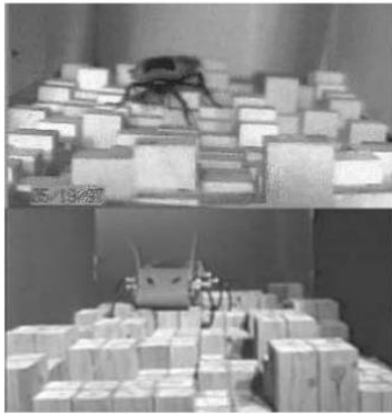


Рис. 2. Рельеф с параметризованными ячейками

В работе используется последний подход с некоторыми модификациями и расширениями.

#### Моделирование робота с использованием симуляции

Робототехнические симуляторы представляют собой программные пакеты, которые могут моделировать кинематику, динамику и создавать виртуальные данные датчиков, используемые программным обеспечением для управления роботом, которое взаимодействует с ними. Одним из распространенных применений таких симуляторов является оптимизация алгоритмов робота, например, оптимизация походки робота [14–16].

Сравнительный анализ популярных робототехнических симуляторов проведен в [17, 18]. На базе указанного обзора и личного опыта авторов для выполнения исследований был выбран симулятор Gazebo, поддерживающий не-

сколько типов физических моделей и имеющий встроенную интеграцию с ROS.

#### Математическая модель робота

Исследуется механическая система, состоящая из твердых тел, движение которых описывается дифференциальными уравнениями вида:

$$M \ddot{\mathbf{u}} = \vec{\mathbf{g}}, \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & M_n \end{bmatrix}, M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\vec{\mathbf{u}}_i^T = [\vec{\mathbf{v}}_i^T \quad \vec{\omega}_i^T], \quad (3)$$

$$\vec{\mathbf{g}}^T = [\dots \vec{F}_i^T, (\vec{\tau}_i - \vec{\omega}_i \times I_i \vec{\omega}_i)^T \dots], \quad (4)$$

где  $M_i$  – матрицы, содержащие массово-инерционные характеристики;  $m_i$  – масса тела;  $I_i$  – тензор инерции;  $\vec{\mathbf{u}}_i$  – вектор обобщенных скоростей;  $E$  – единичная матрица;  $\vec{\mathbf{g}}$  – вектор обобщенных сил;  $\vec{\mathbf{v}}_i$  – вектор линейной скорости;  $\vec{\omega}_i$  – вектор угловой скорости;  $\vec{F}_i$ ,  $\vec{\tau}_i$  – силы и моменты сил взаимодействия.

Тела, входящие в систему, соединены между собой цилиндрическими шарнирами, которые описываются следующими связями и динамическими ограничениями:

$$\phi(q_j, u_{j_1}, \dots, q_{j_k}, u_{j_k}, t) \geq 0, \quad (5)$$

$$\vec{\mathbf{q}}_i^T = [\vec{\mathbf{x}}_i^T \quad \vec{\mathbf{Q}}_i^T], \quad (6)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_i = \begin{bmatrix} E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & G(\vec{\mathbf{q}}_i) \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_i, \quad (7)$$

$$\vec{\mathbf{g}}_i = \tau_i^T \vec{\mathbf{z}}_{i-1} - k \vec{\mathbf{v}}_i \vec{\mathbf{q}}_i, \quad (8)$$

где через  $\phi$  обозначена функция связи, в общем случае нестационарной и неголономной;  $t$  – время;  $q_j$  – вектор обобщенных координат, включающий в себя координаты центра масс



$\vec{x}_i$  и кватернион  $\vec{Q}_i$ , описывающий ориентацию тела в пространстве; через  $G(\vec{q}_i)$  обозначена матрица, вид которой зависит от выбранной системы координат и способа задания ориентации тела;  $k$  – коэффициент вязкого трения в шарнире.

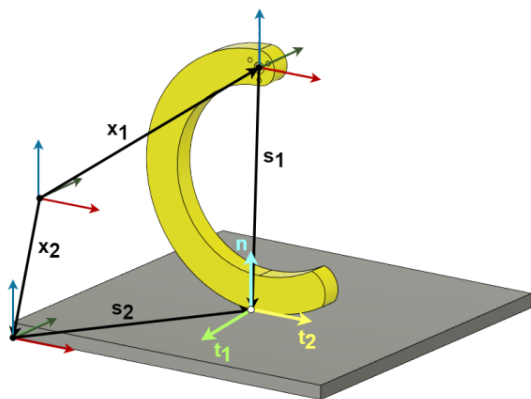


Рис. 3. Описание переменных для модели взаимодействия опорной поверхности и ноги робота

Контакт ног робота с опорной поверхностью (рис. 3) описывается на базе модели сухого трения и выражается следующими уравнениями:

$$\phi_u(\vec{q}) = g(\vec{q}) \geq 0, \quad (9)$$

$$g(\vec{q}) = (\vec{x}_1 + \vec{s}_1 - \vec{x}_2 - \vec{s}_2) \cdot \vec{n}, \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_u(\vec{q}) \approx \begin{bmatrix} \vec{n}^T & (\vec{s}_1 \times \vec{n})^T & -\vec{n}^T & (-\vec{s}_2 \times \vec{n})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{\omega}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{\omega}_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mu f_n \geq \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \\ \vec{v}_t \left( \mu f_n - \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \right) = 0, \\ \frac{\vec{f}_t}{f_t} = -\frac{\vec{v}_t}{v_t} \end{cases} \quad (12)$$

где  $\phi_u(\vec{q})$  – функция связи;  $\mu$  – коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью; радиус-векторы  $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{s}_1, \vec{s}_2$  и орты координатных осей  $\vec{t}_1, \vec{t}_2, \vec{n}$  показаны на рис. 3;  $f_1, f_2$  – значения сил трения вдоль осей  $t_1, t_2$  соответственно.

### Задача оптимизации

Геометрическая модель корпуса робота представлена в виде трехмерного параллелепипеда. Количество движителей по каждому из бортов обозначается через  $\gamma$ . Разность фаз между соседними движителями обозначается через  $\alpha$ , длины ног считаются одинаковыми и обозначаются через  $h_{leg}$  (рис. 4).

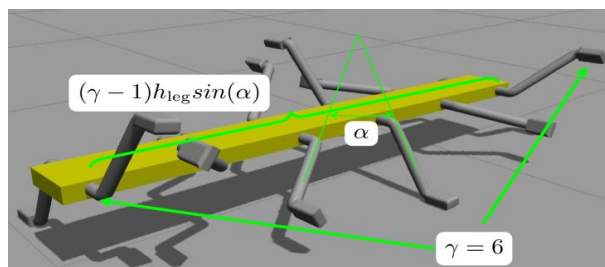


Рис. 4. Схема модели робота для генетического алгоритма

Решается многокритериальная задача оптимизации, в которой максимизируется дистанция, пройденная за фиксированное время по случайно сгенерированной поверхности, и минимизируется длина робота. Дистанция получается как результат симуляции. Длина корпуса робота определяется на основе заданного в явном виде количества ног, их длины и разности фаз между ними исходя из условия полного поворота ног относительно корпуса без помех друг другу. Для задания одинакового направления оптимизации вместо длины корпуса используется обратный критерий.

Таким образом, варьируемыми параметрами модели робота являются  $\gamma$  и  $\alpha$ . Выполняется свертка векторного критерия качества с помощью канонической аддитивно-мультипликативной функции скаляризации:

$$F \rightarrow \max = \beta \left( \omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot \frac{1}{(\gamma-1)h_{\text{leg}} \sin(\alpha)} \right) + (1-\beta) \delta^{\omega_1} \left( \frac{1}{(\gamma-1)h_{\text{leg}} \sin(\alpha)} \right)^{\omega_2}; \quad (13)$$

где  $\delta$  – дистанция;  $\beta$  – изменяемый адаптивный параметр;  $\omega_{1,2} \in [0..1]$  – изменяемые весовые коэффициенты.

### Генерация семейств роботов и проходимых поверхностей

Для генерации семейств роботов и поверхностей были разработаны подпрограммы, которые создавали по заданным параметрам модель робота в формате URDF и случайным образом – модель поверхности в формате SDF.

Подпрограмма генерации поверхности обе-

спечивает создание семейств поверхностей трех типов. При этом предполагается, что члены семейства с одинаковыми параметрами обладают одинаковой сложностью. Поверхности генерируются на основе следующих изменяемых параметров:

- 1) количество ячеек по длине и ширине;
- 2) 3D (рис. 5, а) или 2D (рис. 5 б, в);
- 3) диапазон высоты ячейки (рис. 6);
- 4) ширина и длина ячейки;
- 5) параметр распределения.

На рис. 5 представлены примеры полученных поверхностей.

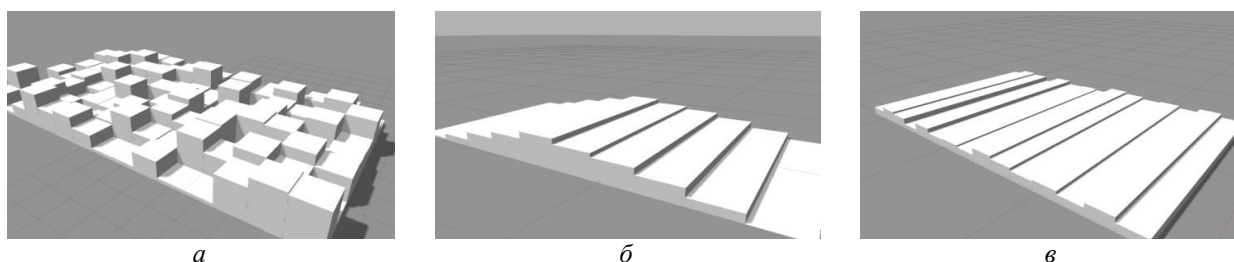


Рис. 5. Примеры поверхности с различными параметрами:  
а – тип Т1: 3D-ячейки с равномерным распределением высот; б – тип Т2: полосы с гауссовой функцией распределения высот;  
в – тип Т3: полосы с нормальным распределением высот

Для тестирования подпрограмм генерации и обоснования значений параметра высоты ячеек проводились численные эксперименты, в рамках которых были заданы три диапазона высот (рис. 6).

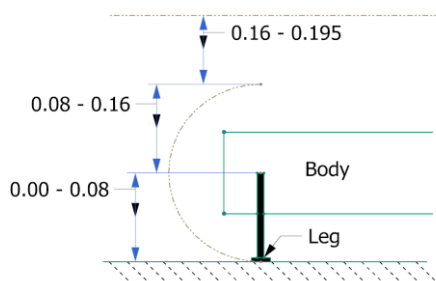


Рис. 6. Три диапазона, предлагаемых для выбора высоты ячеек (значения указаны в метрах)

Для каждого диапазона было сгенерировано 20 поверхностей и 50 различных роботов. В хо-

де численного эксперимента каждый робот пытался пройти все участки. Время движения робота ограничивалось 4 с на преодоление первого уступа с заданным диапазоном высоты. Успешные попытки подсчитывались. Результаты (табл. 2) показывают, что поверхности с высотами первого диапазона почти гарантированно проходимы практически для всех генерируемых роботов, а для поверхностей с высотами третьего диапазона вероятность прохождения случайным роботом составляет менее 50 %.

Таблица 2

#### Процентное соотношение между диапазоном и успешными попытками

Диапазон высоты, м	Успешные попытки
0,00–0,08	99,7 %
0,08–0,16	79,7 %
0,16–0,195	47,3 %

### Разработка оптимизационного алгоритма

Реализация генетического алгоритма основана на библиотеках Dear и OpenAI-ES [19, 20].

Генетический код особи содержит три основных гена: количество ног, угол между двумя соседними ногами и волновое смещение между сторонами, а также один дополнительный ген – пройденная дистанция, – который зависит от других генов и поэтому не участвует в процедурах скрещивания и мутации.

Алгоритм заключается в следующем. После случайной генерации начальной популяции популяция эволюционирует с помощью трех операторов: селекции, основанной на повышенной вероятности выживания сильнейшего; скрещивания, которое представляет собой спаривание между особями, и мутации, которая вносит случайные изменения в значения генов отдельных особей.

Процедура селекции, реализующая турнирный подход, была взята из библиотеки Dear без изменений.

Для реализации процедур скрещивания и мутации были разработаны оригинальные решения:

1) для скрещивания используется общая функция со следующим дополнением. Каждая особь имеет четыре гена, но четвертый ген (расстояние) зависит от других генов. Поэтому функция скрещивания должна работать только с первыми тремя характеристиками;

2) мутация: аналогично скрещиванию, используются только три поля. Модель робота имеет ограничения (например, по максимальной длине), поэтому с некоторой заданной ве-

роятностью каждая из характеристик может быть изменена в определенном интервале. Допускается осуществление с одной и той же особью нескольких мутаций, но с каждым разом вероятность мутации уменьшается.

### Результаты

Численные эксперименты были проведены в два этапа. На первом этапе находился лучший робот для территории T1. На втором этапе рассматривалась зависимость от разных типов ландшафтов при меньшем количестве особей. Весовые коэффициенты  $\omega_1, \omega_2$  варьировались, но здесь и далее приведены данные, полученные при  $\omega_1 = 0,6; \omega_2 = 0,4$ .

В рамках первого этапа каждый робот проходил 10 разных ландшафтов по 9 секунд каждую. После 11 поколений и 200 особей в начальной популяции в результате исследования удалось получить следующие результаты: лучший робот имеет 12 ног, угол между ногами 73 градуса и разность фаз между сторонами 163 градуса. С такими характеристиками робот смог пройти 5,21 метра, в то время как представители начальной популяции проходили за это же время менее 2 метров. На рис. 4 показан лучший робот, найденный на первом этапе.

Второй этап исследований выполнялся при тех же условиях, что и первый, но с измененным размером начальной популяции – 55 особей. Было сгенерировано по 10 семейств поверхностей, состоящих из 9 вариантов в каждой. Заданное на прохождение поверхности время было ограничено 9 секундами. По данным табл. 3 видно, что имеется сходимость в параметрах.

Таблица 3

Зависимость между статистикой целевой функции и типами поверхности

Территория	Популяция	Количество ног	Угол между соседними ногами	AVG	STD
T1 (рис. 5, а)	110	12	73	2,38	0,34
T2 (рис. 5, б)	55	10	68	1,95	0,35
T3 (рис. 5, в)	55	10	77	2,08	0,33

Одним из основных результатов исследования, полученных при варьировании значений весовых коэффициентов  $\omega$ , является зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией (рис. 7), показывающая наличие локального оптимума при количестве ног у робота в диапазоне от 8 до 14.

Авторы полагают, что этот факт может быть объяснен следующими соображениями.

С одной стороны, слишком много ног значительно удлиняет корпус робота, что снижает его профильную проходимость за счет того, что робот с большей вероятностью может задеть выступы при движении. С другой стороны, при слишком малом количестве ног происходит потеря статической устойчивости робота. Поскольку для гарантированного обеспечения статической устойчивости необходимо

обеспечить контакт не менее, чем 4 ног с опорной поверхностью в каждый момент времени,

то естественным ограничением является 8 ног у робота.

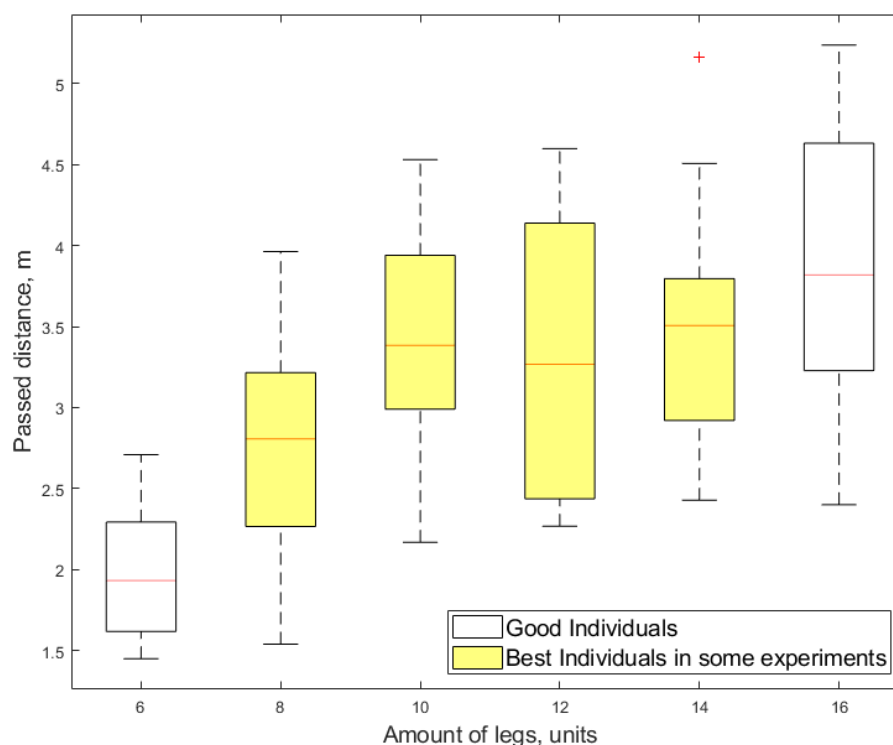


Рис. 7. Зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией

### Выводы

В статье предложен метод оптимизации количества ног у цикловых движителей с одной степенью свободы в ноге с использованием генетического алгоритма и симулятора Gazebo. Представлено обоснование использования такого подхода, показан способ генерации семейств особей и проходимых поверхностей. Предложена функция оптимизации, объединяющая в себе поиск компромисса между проходимостью и длиной конструкции. Была найдена и обоснована зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bulichev, O. Concept Development Of Biomimetic Centipede Robot StriRus / O. Bulichev, A. Klimchik // 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). Bologna: IEEE, 2018. – P. 85–90.
2. Altendorfer, R. et al. RHex: A biologically inspired hexapod runner // Autonomous Robots, 2001.
3. Chen S.-C. et al. Quattroped: A Leg–Wheel Transformable Robot // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2014. – Vol. 19. – № 2. – P. 730–742.
4. Chen W.-H. et al. TurboQuad: A Novel Leg and Fast Behavioral Transitions // IEEE Transactions on Robotics. – 2017. – Vol. 33. – № 5. – P. 1025–1040.
5. Galloway K. et al. X-RHex: A Highly Mobile Hexapodal Robot for Sensorimotor Tasks // Technical Reports (ESE), 2010.
6. Shen S.-Y. et al. Design of a leg-wheel hybrid mobile platform // 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2009. – P. 4682–4687.
7. Boxerbaum, A. S. et al. The latest generation Whegs; robot features a passive-compliant body joint // 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice: IEEE, 2008. – P. 1636–1641.
8. Briskin, E. et al. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application) // Emerging Trends in Mobile Robotics. Nagoya Institute of Technology, Japan: World scientific, 2010. – P. 769–776.
9. Sharonov, N. G. Research of indicators of profile passability of a walking machine with cycle movers / N. G. Sharonov, A. P. Kirillov, A. V. Maloletov // Izvestia VGTU. 2020. – P. 89–93.
10. Feng, S. et al. Optimization-based Full Body Control for the DARPA Robotics Challenge // Journal of Field Robotics. – 2015. – Vol. 32. – № 2. – P. 293–312.
11. Hung, I.-K. Advanced Digital Terrain Analysis Using Roughness-Dissectivity Parameters in GIS, 2004.
12. Howard, A.M. Real-time assessment of terrain traversability for autonomous rover navigation / A. M. Howard, H. Seraji. – 2000. – Vol. 1. – P. 58–63.
13. Sancho-Pradel D.L. et al. A survey on terrain assessment techniques for autonomous operation of planetary robots. – 2010. – Vol. 63. – P. 206–217.
14. Kuo P.-H. et al. Development of Humanoid Robot Simulator for Gait Learning by Using Particle Swarm Optimization. – 2013. – P. 2683–2688.

15. *Berezhnoy, V.* Real-world large-step stair-climbing for small humanoids using evolutionary computation / V. Berezhnoy, A. Klimchik, N. Mavridis. – 2017.

16. *Briskin, E. S.* Estimates of efficiency of cycle mechanisms / E. S. Briskin, Ya. V. Kalinin, A. V. Maloletov // *Mech. Solids*. – 2017. – Vol. 52. – № 2. – P. 128–133.

17. *Nogueira, L.* Comparative analysis between gazebo and v-rep robotic simulators // *Seminario Interno de Cogni-*

*cao Artificial-SICA*. – 2014. – Vol. 2014. – № 5. – P. 2.

18. *Collins, J. et al.* A Review of Physics Simulators for Robotic Applications. – 2021. – Vol. 9. – P. 16.

19. *Fortin, F.-A. et al.* DEAP: Evolutionary algorithms made easy // *Journal of Machine Learning Research*. – 2012. – Vol. 13. – P. 2171–2175.

20. *Salimans, T. et al.* Evolution Strategies as a Scalable Alternative to Reinforcement Learning. arXiv, 2017.

УДК 629.1.03

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-19-23

*Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин, Р. С. Ажгалиев, В. В. Дяшкин-Титов*

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ  
РОБОТИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА  
ДЛЯ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ БАХЧЕВЫХ КУЛЬТУР ПОД ПЛЕНКОЙ**

**Волгоградский государственный аграрный университет**

vgsxa@mail.ru

В статье представлены способы, устройства и машины для выполнения технологического отверстия в пленке. Предложена конструкция для автоматизации технологического процесса при возделывании бахчевых культур под пленкой и описан принцип работы роботизированного устройства, обоснованы габаритные размеры. Выполнен структурный синтез и представлена структура системы управления.

*Ключевые слова:* бахчевые культуры; мульчирующая пленка; сельскохозяйственные роботы, структурный синтез, система управления.

*N. S. Vorob'eva, A. V. Dyashkin, R. S. Azhgaliev, V. V. Dyashkin-Titov*

**SUBSTANTIATION OF THE DESIGN OF A ROBOTIC DEVICE  
FOR CULTIVATING MELONS UNDER A FILM**

**Volgograd State Agrarian University**

The article presents methods, devices and machines for performing technological holes in the film. A design for automating the technological process when cultivating melons under a film is proposed and the principle of operation of the robotic device is described, the overall dimensions are justified. Structural synthesis is performed and the structure of the control system is presented.

*Keywords:* melon crops; mulching film; agricultural work, structural synthesis, control system.

**Введение**

Волгоградская и Астраханская области являются лидерами по производству бахчевых культур. Механизацией возделывания бахчевых культур занимался ряд ученых: А. Н. Цепляев, М. Н. Шапоров, А. В. Седов [1–3] и другие.

При возделывании бахчевых культур для защиты растений от заморозков и получения урожая в ранние сроки применяют технологию мульчирования почвы, путем покрытия пленкой поверхности над семенем, или высаживания рассады в заранее подготовленные отверстия в мульчирующей защитной пленке. При непосредственном высеве культура растет под пленкой до определенной фазы вегетативного

развития, после чего возникает необходимость в надрезе пленки над растением с последующей фиксации вокруг него.

В настоящее время эти операции выполняются в основном вручную, что требует больших трудозатрат. Существующие механизированные устройства для создания отверстий в мульчирующей пленке (рис. 1) применяют только при посадке растений рассадным способом.

Разработки роботизированных устройств, используемых в сельском хозяйстве, также не позволяют осуществлять надрез пленки над растением с последующей фиксацией, так как не адаптированы к работе в поле при выращивании бахчевых культур под пленкой (рис. 2).



а



б

Рис. 1. Устройства для проделывания отверстий под рассаду:  
а – ручной дырокол; б – пленкоукладчик с устройством для проделывания отверстий



а



б

Рис. 2. Роботизированные самоходные машины:  
а – роботизированная самоходная машина от компании Robotti; б – робот-пропольщик Волгоградский ГАУ

В последние годы положение усугубляется в связи с катастрофической нехваткой рабочих сил, при этом надрез пленки над растением с последующей фиксацией необходимо выполнять в короткие агротехнологические сроки.

В связи с существованием этих проблем возникает необходимость в совершенствовании технологического процесса возделывания бахчевых культур с разработкой роботизированного устройства.

#### Формулировка задачи

Предлагается автоматизировать технологический процесс с помощью роботизированного мобильного самоходного шасси. Конструкция роботизированного устройства должна соответствовать ряду требований, учитывающих одновременно особенности возделывания культуры и необходимую функциональность при выполнении операций данного технологического процесса.

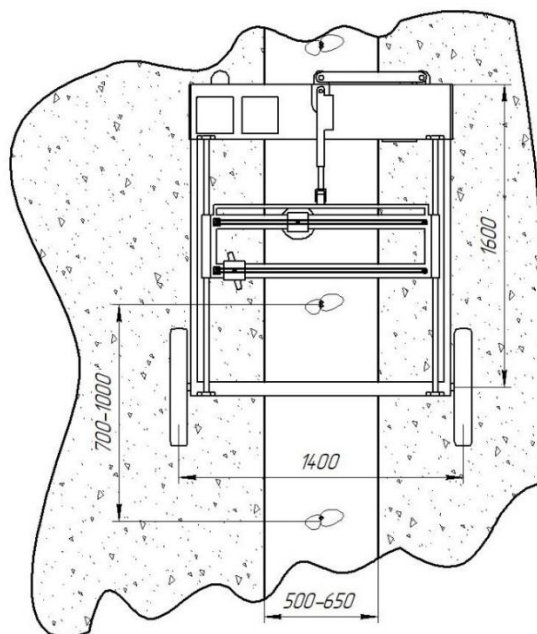


Рис. 3. Схема расположения роботизированного устройства в ряду

Исходя из агротехнологических требований возделывания бахчевых культур, шасси имеет следующие габаритные размеры: колесная база 1600 мм; ширина колеи между ведущими колесами 1400 мм, а между ведомыми – 1300 мм; высота 1200 мм (рис. 3).

С увеличением габаритов конструкции шасси возрастает его масса, что требует применения более мощных приводов ведущих колес. В связи с этим конструкция выполняется из легких конструкционных материалов, а оптимальные размеры определяются эффективной площадью рабочей зоны.

**Описание конструкции**

Для осуществления всех операций технологического процесса предлагается схема роботизированного устройства, базирующаяся на шасси робота-пропольщика [4, 5].

Конструкция (рис. 4) состоит из ведущих колес (мотор-колесо) 1, ведомых (управляемых) колес 2, стоек 3, рамы 4, направляющей 5, коробки с аккумуляторным отсеком и блоком управления 6, рабочих органов 7 и 8, датчиков технического зрения 9, каретки 10, рулевого механизма 11, линейного привода 12 для переме-

щения каретки 10, электродвигателя с ременной передачей 14, приводов рабочих органов 15.

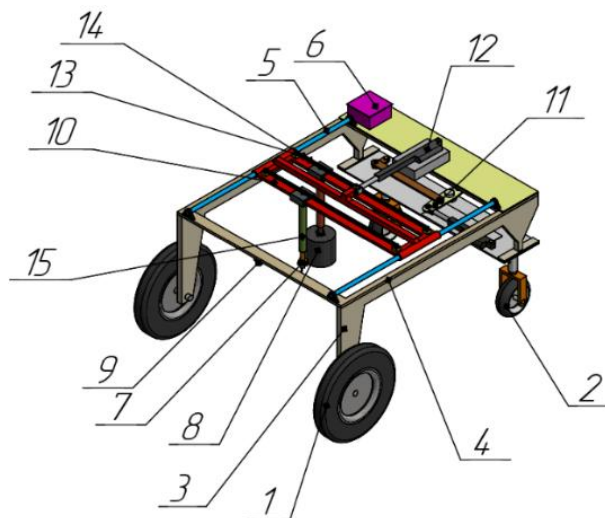


Рис. 4. Конструкция роботизированного устройства

Механизм привода рабочих органов мобильного самоходного шасси (рис. 5) представляет собой плоский механизм параллельно-последовательной структуры и имеет пять степеней подвижности рабочего органа – ножей.

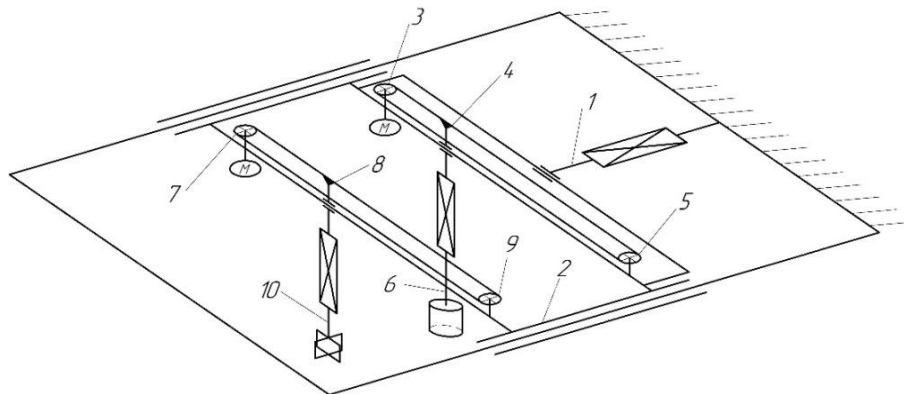


Рис. 5. Схема перемещения рабочих органов

Степень подвижности выходных звеньев определяется по формуле Сомова – Малышева для пространственных механизмов [6]:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6 \cdot 10 - 5 \cdot 11 = 5.$$

В результате структурного синтеза получается так, чтобы растение находилось в области действия рабочих органов 7 и 8. Далее с помощью линейного привода 12 по направляющим 5 перемещается каретка 10 таким образом, чтобы первый рабочий орган 7 находился над растением. Подвод рабочего органа 7 к пленке выполняется с помощью привода 15

колесами. В блоке управления 6 (рис. 4), с заранее установленными исходными данными, происходит настройка самоходного шасси. С помощью датчиков системы технического зрения 9 определяются координаты растения относительно корпуса шасси, и шасси перемещается так, чтобы растение находилось в области действия рабочих органов 7 и 8. Далее с помощью линейного привода 12 по направляющим 5 перемещается каретка 10 таким образом, чтобы первый рабочий орган 7 находился над растением. Подвод рабочего органа 7 к пленке выполняется с помощью привода 15

**Принцип работы роботизированного устройства**

Мобильное самоходное шасси заезжает в поле в рядок, при этом ряд находится между

выдвижением штока актуатора. С помощью датчиков определяется расстояние до пленки, которое контролируется для предотвращения травмирования растения в процессе надреза. Надрез пленки производится в горизонтальной плоскости с помощью ножа. Первый и второй надрез выполняются перемещением ножа в вертикальной плоскости, путем поворота его на 90 градусов.

После того как закончился процесс надреза пленки, первый рабочий орган 7 возвращается в исходное состояние. По данным местоположения первого рабочего органа позиционируется второй рабочий орган 8. Производится вдавливание краев надрезанной пленки в грунт. Таким образом, пленка после отвода рабочего органа фиксируется. Рабочий орган 8 представляет собой пустотелый цилиндр определенного диаметра с заостренными краями. Как только закончится технологический процесс, оператор с помощью видеокамеры оценивает качество операции. В процессе обучения проводится настройка параметров регулировок системы управления, что позволяет снижать вероятность огрехов.

#### Система управления

На рис. 6 приведена структура системы управления манипуляционным механизмом с пятью степенями подвижности, построенная на отдельных контроллерах положения электроприводами [7, 8].

В основу верхнего уровня положен микрокомпьютер Raspberry Pi 3 Model B. Данный микрокомпьютер основан на процессоре Broadcom BCM2837 с четырьмя 64-битными ядрами ARM Cortex A-53, работающими на частоте 1.2 ГГц; он имеет 1 Гб оперативной памяти, порты USB, RS-232, I2C и GPIO, встроенный блок Wi-Fi. Использование в системе управления полноценного микрокомпьютера вместо микроконтроллера позволяет осуществлять реализацию достаточно сложных алгоритмов управления, поддержку WiFi и построение системы технического зрения. В то же время Raspberry Pi отличается низким энергопотреблением, что существенно в автономном мобильном роботе, и невысокой ценой при достаточной производительности.

Система управления нижнего уровня работает с исполнительными механизмами системы,

имеющей четыре актуатора, два шаговых двигателя и два мотор-колеса; осуществляет текущий контроль состояния линейных приводов и мотор-колес и реализует программно-заданные законы перемещения рабочих органов.

Управление актуаторами осуществляется с помощью контроллера положения собственной разработки. Центральным элементом контроллера положения является вычислительное ядро, реализующее функции автоматического управления, на базе микроконтроллера STM32F100RBT6. Возможностей данного микроконтроллера достаточно для реализации вычислений системы автоматического регулирования.

Поддержка работы с сетями WiFi реализована с помощью модуля ESP8266-F12. Данный модуль имеет достаточно обширную систему портов ввода/вывода, и на базе только этого модуля можно реализовать контроллер положения, однако внутренне ПО чувствительно к операциям, вносящим задержки в работу стека, и длительные операции неприемлемы (например, обработка массива значений, полученных с АЦП). Поэтому данный модуль занимается только организацией работы с сетью. Взаимодействие с ведущим контроллером осуществляется по интерфейсу USART на скорости 115200 б/с.

Непосредственное управление направлением и скоростью движения двигателя с учетом приведенных ранее параметров возложено на двухканальный мостовой усилитель мощности на интегральной схеме VNH3SP30. Мостовой усилитель работает с напряжением в диапазоне 7–36 В, а рабочий ток может достигать 30 А на канал. В схеме реализована защита от подачи высокого напряжения (при уровне напряжения выше 36 В схема просто отключается), а также – защита от перегрева. При длительной работе с током 30 А (около 35 с) защита срабатывает.

Мониторинг потребляемого электродвигателем тока осуществляется с помощью датчика ACS712. Принцип его работы основан на эффекте Холла. Максимальный измеряемый ток может достигать 30 А при напряжении до 354 В постоянного тока, а шаг измерения составляет 66 мВ/А. Гарантированный уровень шума в показаниях составляет 7 мВ, что можно устранить, применив методы фильтрации.



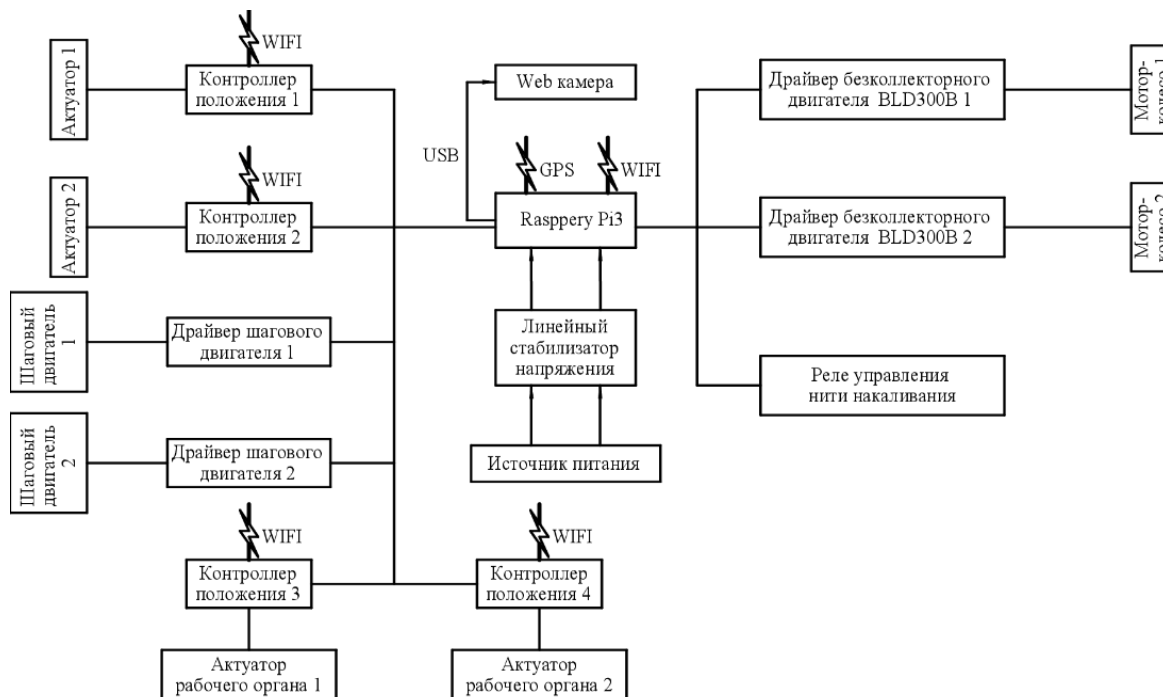


Рис. 6. Функциональная схема системы управления

Суммарное пиковое потребление тока основных компонентов системы не превышает 400 мА при напряжении 3,3 В. Для питания от бортовой сети 12 В применен понижающий до 5 В импульсный стабилизатор LM2596, с максимальным выходным током до 3 А. Напряжение 5 В применяется для питания цифровой части энкодеров и датчиков. Для понижения до 3,3 В применяется линейный стабилизатор AMS1117, с максимальным выходным током до 800 мА.

### Заключение

Таким образом, разработанное роботизированное устройство на базе мобильного самоходного шасси для возделывания бахчевых культур позволяет: снизить затраты на трудовые ресурсы; усовершенствовать технологический процесс возделывания бахчевых культур; минимизировать вред окружающей среде.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комплексная механизация бахчеводства на основе инновационных технологий / А. Н. Цепляев, В. Г. Абезин, М. Н. Шапоров, В. А. Цепляев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – Волгоград, 2008.

2. Цепляев, А. Н. Определение оптимальных параметров высевающего аппарата для проросших семян бахчевых культур / А. Н. Цепляев, В. Г. Абезин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – Волгоград, 2008.

3. Факторы, влияющие на технологический процесс уборки бахчевых культур / М. Н. Шапоров, А. В. Седов, О. П. Седова, А. В. Гурба // Глобальные вызовы для продовольственной безопасности: риски и возможности. – Казань, 2021.

4. Пат. 2703775 Российская Федерация. Робот-пропольщик / Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин, А. Г. Иванов, И. А. Несмиянов, В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов; заявитель и патентообладатель Волгоградский ГАУ. – № 2019102105; заявл. 25.01.19; опубл. 22.10.19. – 9 с.: ил.

5. Пат. 2703092 Российская Федерация. Робот-пропольщик / Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин, А. Г. Иванов, И. А. Несмиянов, В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов; заявитель и патентообладатель Волгоградский ГАУ. – № 2019102103; заявл. 25.01.19; опубл. 15.10.19. – 8 с.: ил.

6. Семенов, Ю. А. Структурный анализ механизмов / Ю. А. Семенов, Н. С. Семенова // Теория механизмов и машин. – 2003. – № 2. – С. 3–14.

7. Юревич, Е. И. Теория автоматического управления: Учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Системный анализ и управление». – СПб.: Изд-во БВХ, 2007. – 460 с.

8. Юревич, Е. И. Интеллектуальные роботы: Учебное пособие для вузов / И. А. Каляев [и др.]; под общей ред. Е. И. Юревича. – М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.

УДК62-526 + 004.932.4

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-24-28

*А. С. Горобцов, А. Е. Марков, П. С. Тарасов, А. В. Дианский, М. С. Бурмистенко***ПРОГРАММНАЯ СРЕДА ОТЛАДКИ ПРОГРАММ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ МАШИН****Волгоградский государственный технический университет**

vm@vstu.ru, markovalex95@gmail.com, tarasradio@mail.ru, burm87@mail.ru

Рассмотрена программная среда для отладки программ электронных блоков управления роботами и роботизированными машинами. Программная среда позволяет получать многомерные тестовые наборы входных данных блоков управления с помощью математической модели в режиме, близком к режиму реального времени. В рассматриваемой среде также представляется и обрабатывается пульт управления роботизированными машинами.

*Ключевые слова:* управление, программирование микропроцессоров, моделирование, виртуальные модели, роботы.

*A. S. Gorobtsov, A. E. Markov, P. S. Tarasov, A. V. Dianskiy, M. S. Burmistenko***SOFTWARE DEBUGGING ENVIRONMENT  
FOR ELECTRONIC CONTROL UNITS OF MACHINES****Volgograd State Technical University**

A software environment for debugging programs of electronic control units of machines is considered. The software environment allows you to obtain multidimensional test sets of control unit input data using a mathematical model in a mode close to real-time mode. In the considered environment, the control panel is also presented and worked out. The developed formalism and interfaces allow using the proposed environment for debugging control programs of various machines.

*Keywords:* control, programming of microprocessors, modeling, virtual models.

**Введение**

Современные электронные блоки управления, используемые в роботах и роботизированных машинах различного назначения, обладают широкими возможностями и позволяют реализовывать на них все более сложные алгоритмы. Такие алгоритмы характеризуются многоканальным потоком входных данных с высокой частотой дискретизации, более 100 Гц. Доводка программ управляющих блоков, выполняемая на натуральных образцах, требует высоких временных и материальных затрат. Получение тестовых наборов входных данных на математических моделях позволило бы значительно повысить эффективность разработки как самих программ управления, так и систем управления в целом. Существующие методы создания управляющих систем, с использованием таких средств математического моделирования, как MatLab, Simulink [3, 4], позволяют это сделать для объектов, которые описываются математическими моделями относительно небольшой размерности. Для сложных объектов необходимо использовать специализированные системы моделирования. В данной работе представ-

лено использование для этих целей системы моделирования динамики связанных систем тел ФРУНД.

**Общая схема программной среды  
отладки управляющих программ  
роботизированных машин**

Общая схема программной среды для отладки управляющих программ представлена на рис. 1. Схема содержит два элемента, которые необходимы для работы системы управления в составе машины – виртуальный пульт управления и программу управления. Виртуальный пульт управления непосредственно используется в дальнейшем при программировании органов управления системы – как правило, это некоторый интерактивный интерфейс, реализованный на специализированной аппаратной базе. Программа управления непосредственно предназначена для прошивки электронного блока управления. Предполагается, что программа управления написана на некотором подмножестве заданного языка высокого уровня, допускающего получение кода прошивки без дополнительных преобразований.

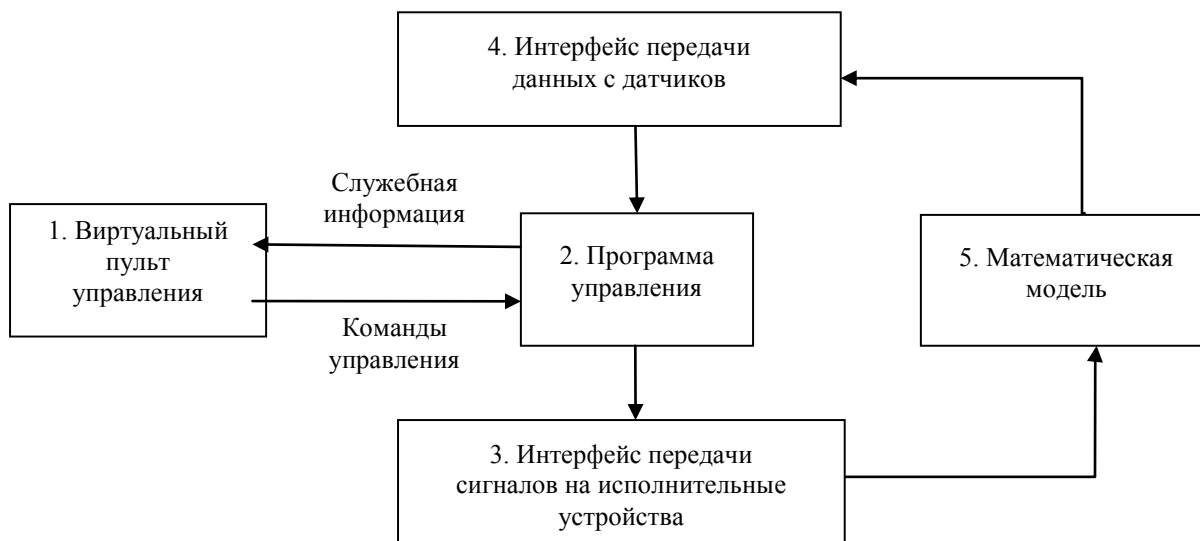


Рис. 1. Блок-схема программной среды отладки управляющих программ роботов и роботизированных машин

Современные программы электронных блоков управления, оперируют с многомерными последовательностями входных сигналов от датчиков. Тестовые наборы таких сигналов можно эффективно генерировать только с помощью математических моделей. Таким образом, программная среда, изображенная на рис. 1, при условии использования сложных математических моделей, позволяет вести отладку программы управления на близких к реальным входным данным.

Отметим, что программа управления не зависит от математической модели, взаимодействие с которой осуществляется за счет независимых выходного и входного интерфейсов.

Выполненная техническая реализация программной среды, представленной на рис. 1, базируется на системе моделирования ФРУНД [1] и включает два программных модуля. Первый модуль содержит блоки 1–4 и встроен в интерфейс пользователя с математическими моделями системы моделирования ФРУНД, написан на языке С. Второй модуль – блок 5 – является программой решения уравнений модели и написан на языке ФОРТРАН. Связь между модулями осуществляется через сокет.

Далее рассматривается пример работы программной среды для мехатронной системы – управляемой подвески автомобиля.

#### Математическая модель автомобиля с гидропневматической управляемой подвеской

В качестве примера рассмотрена управляемая подвеска четырехосного автомобиля. Рас-

четная схема модели конструкции автомобиля представлена на рис. 2. Модель включает в себя несущую раму и надстройку, как упругие тела; кабину; силовой агрегат; подвески мостов с точным учетом кинематики и модель рулевого управления. Все тела, кроме рамы и надстройки, в модели считались твердыми.

Упругие свойства рамы и надстройки задаются с помощью упрощенных сегментных моделей, настроенных на воспроизведение нескольких низших частот упругих колебаний в заданном диапазоне и позволяющих учитывать «большие движения» автомобиля. Диапазон семи низших частот рамы – 4,2–17 Гц, надстройки – 3,5–14,6 Гц.

Кабина и силовой агрегат, как уже отмечалось, моделируются твердыми телами, соединенными с рамой трехмерными упругими виброизоляторами. Расчетные схемы мостов включают в себя реактивные тяги, соединенные рамой и мостом с помощью упругого шарнира. Модели мостов содержат поворотные ступицы и вращающиеся на них колеса. Поворот ступиц на двух передних мостах задается смещением тяг рулевого механизма. Вращающиеся колеса позволяют моделировать разгон – торможение автомобиля приложением к ним соответствующих моментов.

Упругая характеристика гидропневматической рессоры (ГПР) задается двумя пневматическими элементами, соответствующими поршневой и штоковой полостям. Для моделирования пневмоэлемента штоковой полости модель ГПР включает в себя два тела, соответствующих ци-

линдру и штоку ГПР и перемещающихся соосно. Это позволяет реализовать в модели особенность работы штоковой пневмополости, для которой общее сжатие подвески (сжатие поршневой пневмополости) сопровождается расширением штоковой. Полная сила в таком упругом

элементе может быть замерена в шарнирах крепления цилиндра или штока. Демпфирующая характеристика ГПР задается стандартной кусочно-линейной функцией из четырех участков. Такая функция может задаваться независимо для поршневой и штоковой полостей.

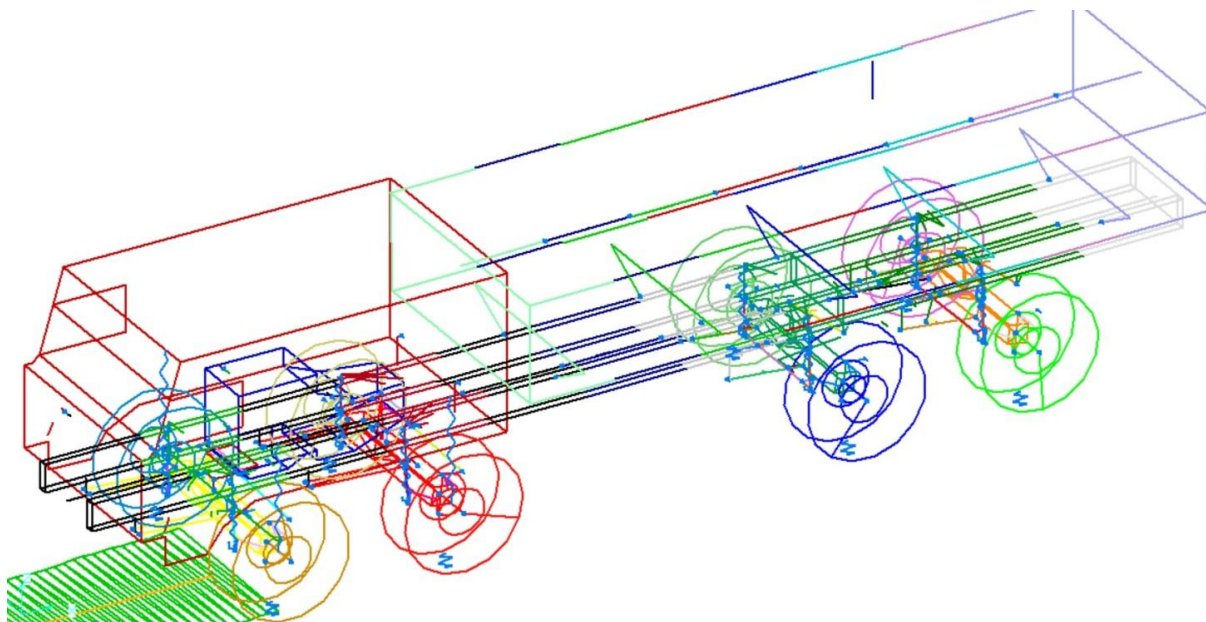


Рис. 2. Расчетная схема автомобиля с гидропневматической управляемой подвеской

В модели используется пространственная модель контакта шины с дорогой, которая включает три силы и момент относительно вертикальной оси. Зависимость боковой силы в шине от угла увода и вертикальной нагрузки задается в табличном виде.

Модель гидросистемы включена в модель системы управления подвеской в обобщенном виде, задающем схему подключения пневмополостей всех ГПР подвески. Данное представление позволяет моделировать произвольное коммутирование пневмополостей и изменять его по командам управления. Гидравлическое сопротивление в таком представлении задается параметром, определяющим время выравнивания давлений в соединенных объемах.

Схема подключений содержит список соединенных пневмополостей, а также, в случае необходимости, линии нагнетания и слива и расходы в них. Схема подключений может изменяться в заданные моменты времени. Считается, что если список подключений пуст, то все пневмополости ГПР разделены и давление

в них зависит только от относительной деформации подвески. При коммутации пневмополостей давление в них выравнивается в течение некоторого времени, зависящего от гидравлического сопротивления соединительных каналов. Поскольку проходные сечения трубопроводов достаточно большие, принимается допущение, что время переходного процесса установления давления в коммутируемых пневмополостях мало и составляет величину порядка 1 с.

#### Интерфейс программной среды

Пример экрана программной среды показан на рис. 3. Отладка программы управления подразумевает моделирование различных режимов работы подвески путем выдачи соответствующих команд с пульта управления. Отработка режимов наблюдается визуально с помощью анимации движения расчетной схемы объекта. На рис. 3 показан режим поднятия левого колеса второго моста автомобиля в неподвижном положении – на пульте управления нажата кнопка «Поднять колесо 3».

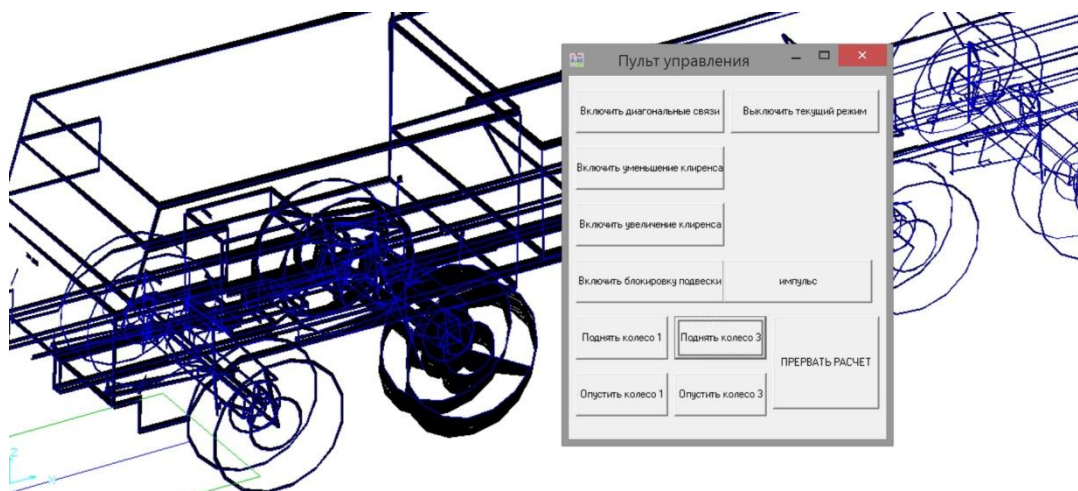


Рис. 3. Пример экрана среды отладки

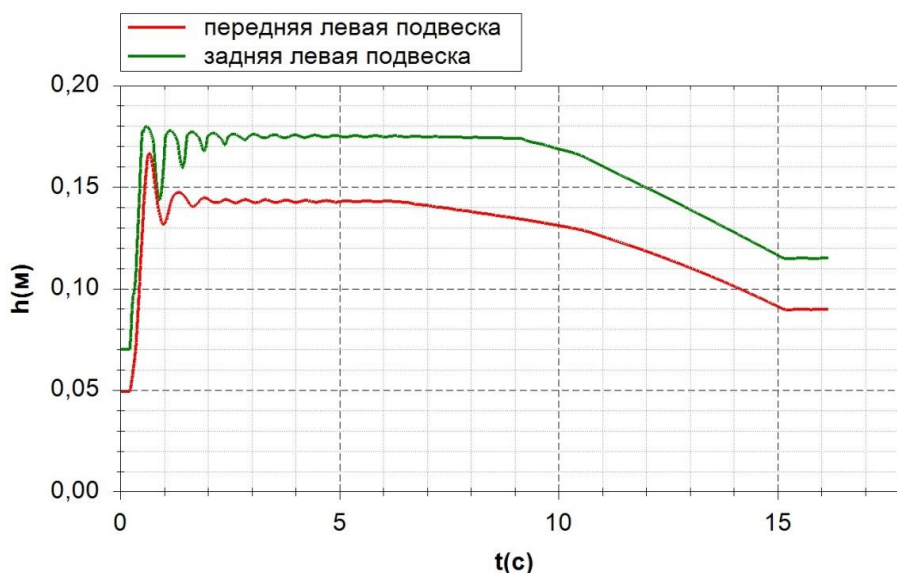


Рис. 4. Изменение хода подвески при выполнении команды увеличения клиренса

Для детального анализа можно воспользоваться графиками изменения во времени различных параметров. На рис. 4 показаны графики изменения хода передней и задней подвесок левого борта при выполнении команды увеличения клиренса. Для режима работы, изображенного на рис. 4, в начальный момент времени происходит коммутация четырех групп поршневых и штоковых полостей ГПР. После установления переходного процесса в момент времени 6 с включается режим увеличения клиренса – в соответствующие четыре группы пневмополостей подается жидкость с заданным расходом. В момент времени 15 с увеличение клиренса выключается. Показанный режим изменения клиренса соответствует алгоритму без выравнивания скоростей подъема подвесок. На

графиках наблюдается характерный для такого алгоритма эффект – сначала начинает двигаться наименее нагруженная подвеска (передняя), а затем, после увеличения давления, начинает двигаться задняя, более нагруженная подвеска. Результаты моделирования позволяют определять необходимые изменения в алгоритме управления и вносить их в программу управления. В качестве методов управления могут использоваться как эмпирические методы, так и методы, полученные, например, с помощью решения обратной задачи [2].

#### Заключение

Представленная программная среда позволяет проводить отладку программ электронных блоков управления роботами и роботизирован-

ными машинами на тестовых наборах данных, получаемых в реальном режиме времени из математических моделей высокой адекватности. Одновременно также отрабатываются вид и форма органов управления, которые потом непосредственно могут быть перенесены в бортовые органы управления машины.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомо-

билей / А. С. Горобцов, С. К. Карцов., А. Е. Плетнев, Ю. А. Поляков. – М.: Машиностроение, 2011. – 462 с.

2. Горобцов, А. С. Синтез параметров управляемого движения многозвенных механических систем произвольной структуры методом обратной задачи / А. С. Горобцов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 6. – С. 43–50.

3. Мэтьюз, Джон Г. Численные методы. Использование MatLab / Джон Г. Мэтьюз, Куртис Д. Финк. – М.: Вильямс, 2001. – 713 с.

4. Понятский, В. М. Автоматизированная технология генерации программы в среде MATLAB для реализации алгоритмов управления рулевого привода / В. М. Понятский, Д. В. Кушников, В. Г. Федорищева // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – Вып. 2. – С. 357–362.

УДК629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-28-33

*М. И. Ефимов, П. С. Артемьев, Г. Ю. Прокудин*

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТРОСОВОГО РОБОТА ПО РОВНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ\*

**Волгоградский государственный технический университет**

dtm@vstu.ru

Разработана экспериментальная установка тросового робота вертикального перемещения. Анализируются результаты моделирования вертикального движения тросового робота. Оценивается устойчивость тросового робота от воздействия внешней возмущающей нагрузки на различных этапах движения.

*Ключевые слова:* тросовый робот, вертикальное перемещение.

*M. I. Efimov, P. S. Artemyev, G. Yu. Prokudin*

### EXPERIMENTAL STUDY OF THE MOVEMENT OF CABLE WORK ON A SMOOTH VERTICAL SURFACE

**Volgograd State Technical University**

An experimental installation of a rope robot for vertical movement has been developed. The results of modeling the vertical movement of the cable car are analyzed. The stability of the cable robot from the influence of an external disturbing load at various stages of movement is evaluated.

*Keywords:* rope robot, vertical movement.

#### Введение

Изучение способов перемещения по вертикальным поверхностям и разработка конструкций роботов на их основе остается актуальной как научной, так и инженерной задачей. Среди множества передоложенных конструкций [1–3] выгодно отличаются тросовые роботы вертикального перемещения [4–8]. Предложенная математическая модель [9] достаточно хорошо описывает движение таких роботов, но требует экспериментальной проверки. Поэтому необходимо на действующем макете оценить влияние его массово-геометрических параметров на устойчивость движения робота для различных его конфигураций.

#### Схема установки и методика эксперимента

Экспериментальная установка робота представляет из себя модель тросового робота с четырьмя роликовыми опорами и двумя тросовыми движителями (рис. 1). Привод тросов осуществляется шаговым двигателем, расположенным на корпусе установки, через направляющий элемент. Ролики робота могут совместно изменять направление движения при помощи ременной передачи, приводимой шаговым двигателем, также установленным на корпусе установки. На корпусе робота усвоен привод перемещения дополнительного груза, позволяющий совершать его перемещение в горизонтальной плоскости установки.

© Ефимов М. И., Артемьев П. С., Прокудин Г. Ю., 2022.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90130.

В связи с небольшой скоростью движения установки исследование движения производится методом видеосъемки процесса перемещения с последующей обработкой видеозаписи на ЭВМ.

Установка подвешена на ровной вертикальной поверхности с нанесенной на ней масштабной координатной сеткой. На установке размещены две стрелки указателя, по показаниям которых на координатной сетке определяется положение установки. Для получения более точных результатов стрелки приближены к вертикальной поверхности максимально близко, что позволяет исключить искажение

результатов от изменения угла зрения при движении установки.

Для оценки устойчивости установки от действия горизонтальной возмущающей нагрузки, действующей параллельно вертикальной поверхности, через вспомогательный трос, прикрепленный к установке и обводной ролик, установленный на стойке вдали от тросового робота, прикладывается нагрузка с помощью установки на трос мерных грузов. Оценивается нагрузка, при превышении которой установка смещается относительно своего начального положения.

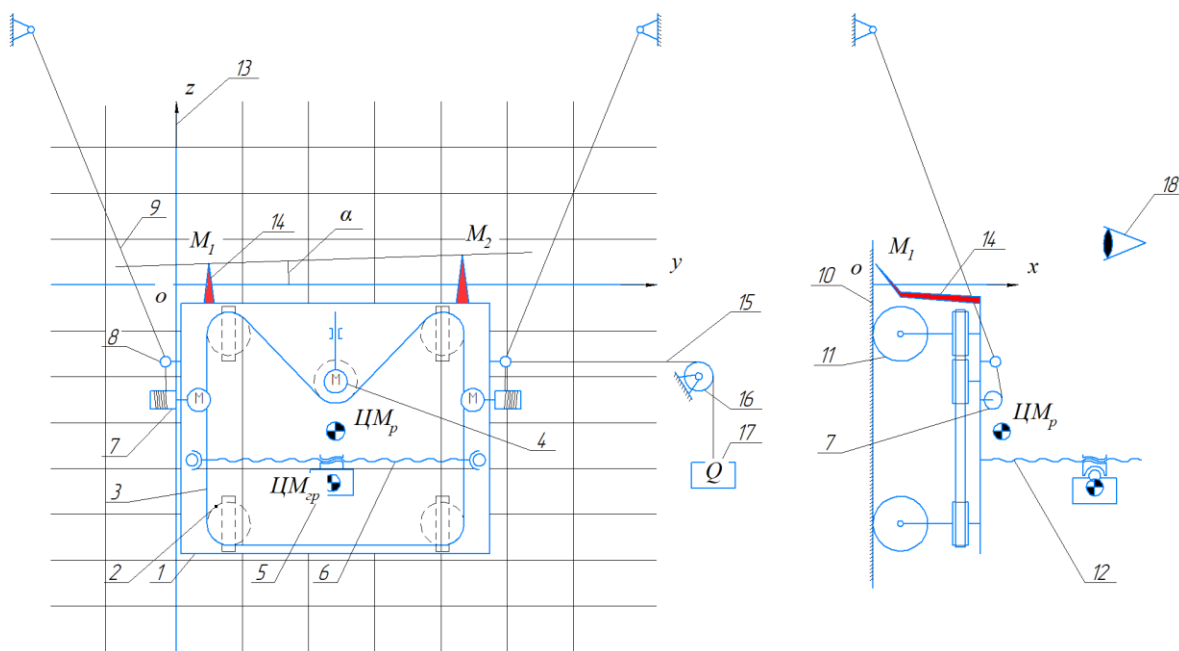


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

1 – корпус; 2 – приводной шкив опоры; 3 – зубчатый ремень; 4 – привод механизма поворота колес; 5 – груз; 6 – привод груза вдоль оси  $y$ ; 7 – привод троса; 8 – направляющая; 9 – трос; 10 – вертикальная поверхность; 11 – ролик; 12 – привод груза вдоль оси  $x$ ; 13 – измерительная сетка; 14 – указатели; 15 – вспомогательный трос; 16 – обводной ролик; 17 – мерный груз; 18 – наблюдатель

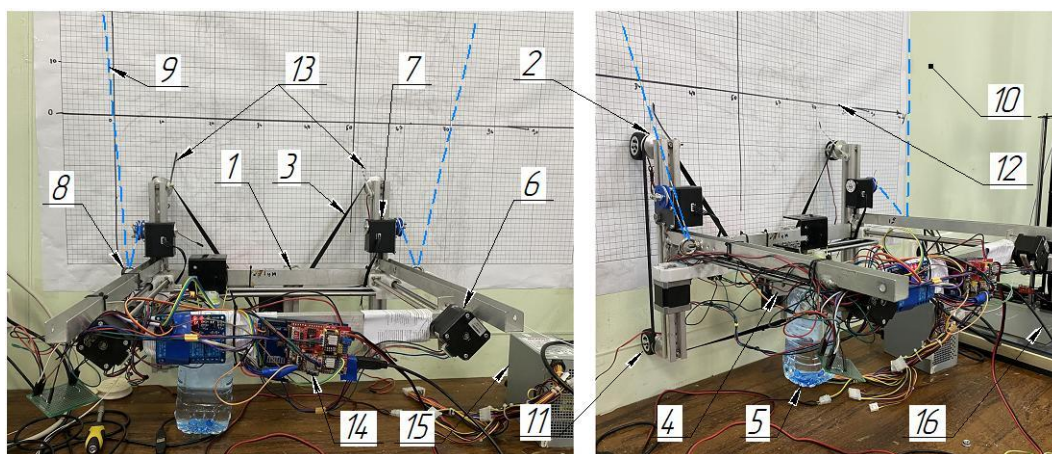


Рис. 2. Тросовый робот, лабораторная установка:

1 – корпус; 2 – приводной шкив опоры; 3 – зубчатый ремень; 4 – привод механизма поворота колес; 5 – груз; 6 – привод груза вдоль оси  $y$ ; 7 – привод троса; 8 – направляющая; 9 – трос; 10 – вертикальная поверхность; 11 – ролик; 12 – измерительная сетка; 13 – указатели; 14 – плата управления; 15 – блок питания; 16 – кабель управления

Установка соответствует разработанной схеме эксперимента и представляет из себя металлоконструкцию с установленными на ней приводными механизмами, управляющими устройствами (рис. 2). Дополнительно установка содержит стойку (рис. 3), с помощью которой выполняется нагружение установки внешней возмущающей нагрузкой. Управление движением робота осуществляется посредством ЭВМ, соединенной с платой управления на установке. Окно приложения для управления установкой изображено на рис. 4.

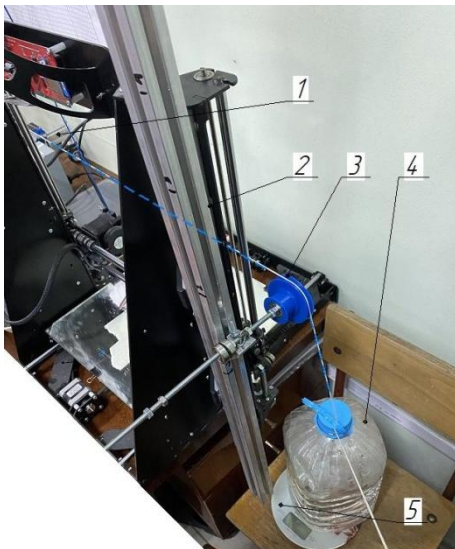


Рис. 3. Направляющая стойка, лабораторная установка:

1 – тросовый робот; 2 – направляющая; 3 – обводной ролик; 4 – груз; 5 – измерительное устройство (весы электронные)

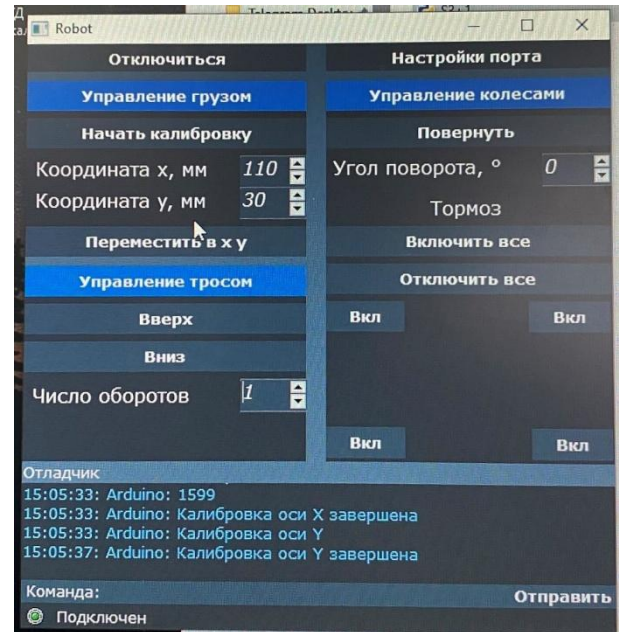


Рис. 4. Окно приложения для управления лабораторной установкой

Установка имеет следующие основные параметры: координаты характерных точек (в соответствии с рис. 5)  $Q_1(0; 283; -110)$ ;  $Q_2(0; 748; -110)$ ;  $Q_3(0; 283; -455)$ ;  $Q_4(0; 748; -455)$ ;  $M_1(210; 273; -260)$ ;  $M_2(228; 758; -260)$ ;  $M_{1k}(0; -120; 1400)$ ;  $M_{2k}(0; 1000; 1400)$ ;  $G(228; 510; -276)$ ; масса робота – 5,38 кг; масса дополнительного груза – 1 кг. Данное положение робота считается исходным. Внешняя возмущающая сила  $P$  прикладывается вдоль центра масс робота согласно схеме на рис. 5.

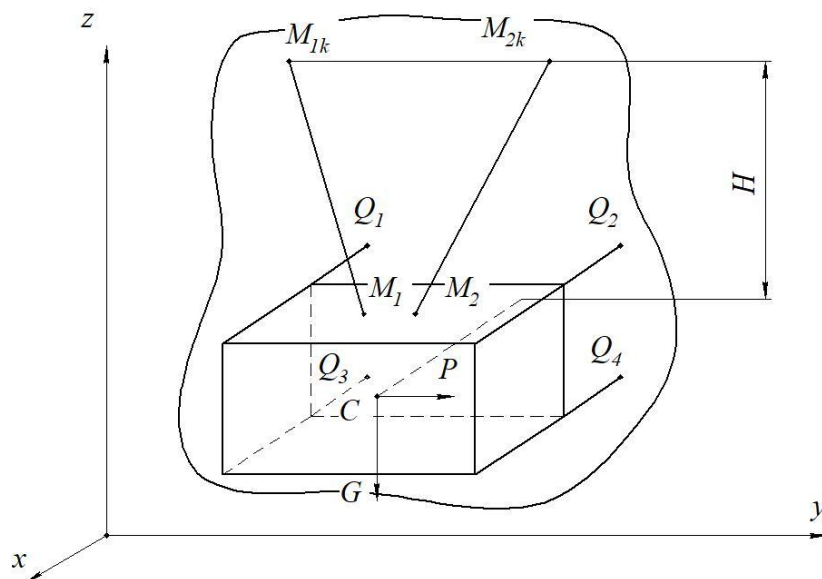


Рис. 5. Общий вид тросового робота



**Постановка задачи**

Ставится задача о проведении исследования вертикального движения тросового робота с целью оценки адекватности предложенного способа перемещения робота и разработанной математической модели его движения.

Проведены измерения для следующих вариантов движения тросового робота:

- а) перемещение вверх из исходного положения и возвращение обратно, без установки дополнительного груза;
- б) перемещение вверх и возвращение обратно, без установки дополнительного груза со смещением робота относительно исходного положения на 200 мм левее вдоль оси  $Oy$ ;
- в) перемещение вверх из исходного положения и возвращение обратно, с установкой дополнительного груза;
- г) перемещение вверх из исходного положения и возвращение обратно, с установкой дополнительного груза и его смещением относительно центра масс робота на 110 мм левее вдоль оси  $Oy$ ;
- д) перемещение вверх из исходного положения и возвращение обратно, с установкой дополнительного груза и его смещением отно-

сительно центра масс робота на 70 мм от вертикальной поверхности вдоль оси  $Ox$ ;

е) перемещение вверх и возвращение обратно со смещением робота относительно исходного положения на 200 мм левее вдоль оси  $Oy$ , с установкой дополнительного груза и его смещением относительно центра масс робота на 70 мм от вертикальной поверхности вдоль оси  $Ox$ ;

ж) перемещение вверх и возвращение обратно со смещением робота относительно исходного положения на 200 мм левее вдоль оси  $Oy$ , с установкой дополнительного груза и его смещением относительно центра масс робота на 110 мм левее вдоль оси  $Oy$ .

**Результаты эксперимента**

Перемещение робота фиксируется по положению указателя  $M_1$  и углу его поворота  $\alpha$  (рис. 1). Для сравнения проведены расчеты действующих сил для аналогичных конфигураций робота согласно математической модели [4].

$$\alpha = \arctg(Z_{M2} - Z_{M1} / Y_{M2} - Y_{M1}).$$

Результаты эксперимента представлены на рис. 6–8.

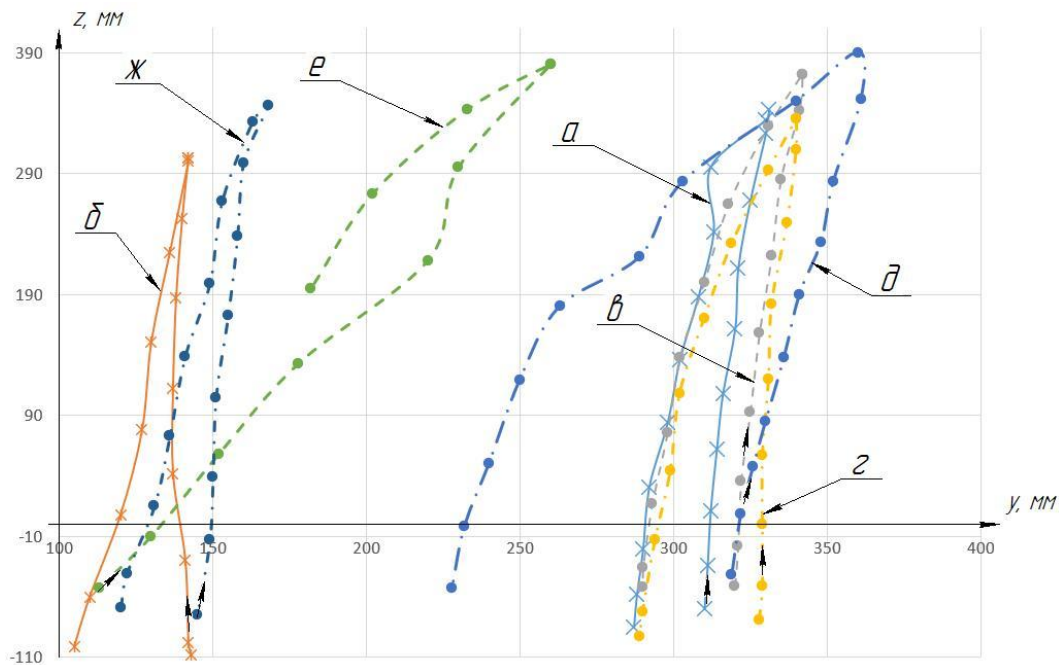


Рис. 6. Координаты перемещения точки  $M_1$  для различных вариантов движения в соответствии с поставленной задачей

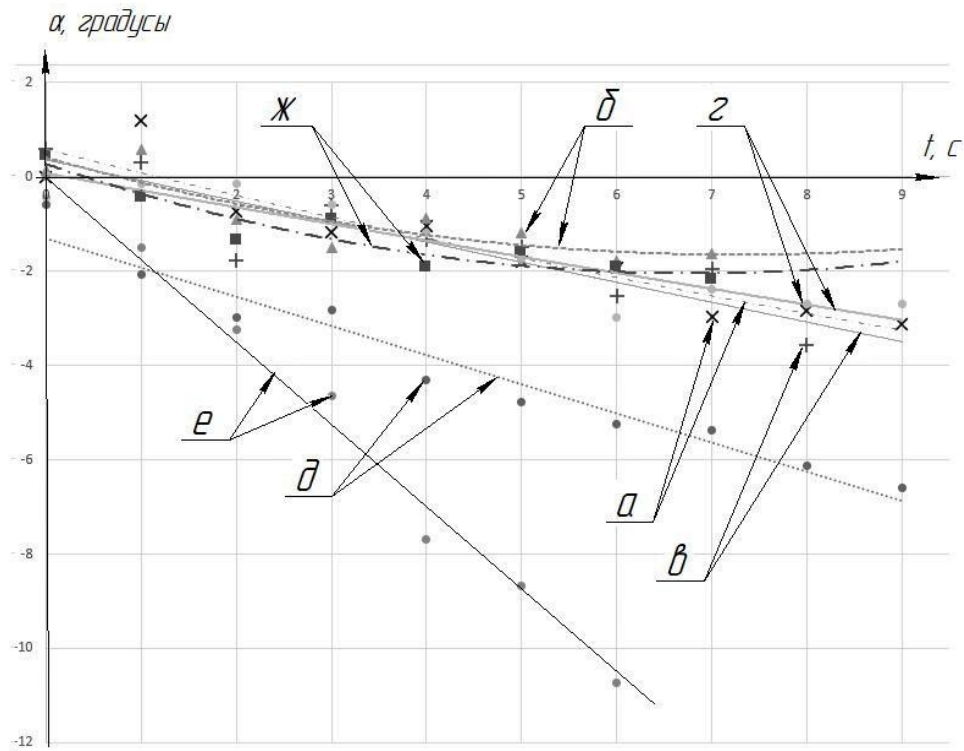


Рис. 7. Изменение угла поворота робота  $\alpha$  в процессе движения для различных вариантов движения с их линиями тренда в соответствии с поставленной задачей

Равномерность движения робота была выше именно для тех вариантов нагружения, для которых были выбраны наиболее выгодные конфигурации движения. Так, смещение дополнительного груза вдоль оси  $Ox$  (варианты  $\bar{a}$ ,  $e$ ) приводило к наибольшим отклонениям робота

(поворот на 6,3 и 10,6 градусов соответственно) от горизонтали. А смещение груза левее вдоль оси  $Oy$  (невыгодная конфигурация) при движении из исходного положения приводило к большему смещению робота, чем при более выгодных вариантах движения  $a$  и  $\mathcal{J}$ .

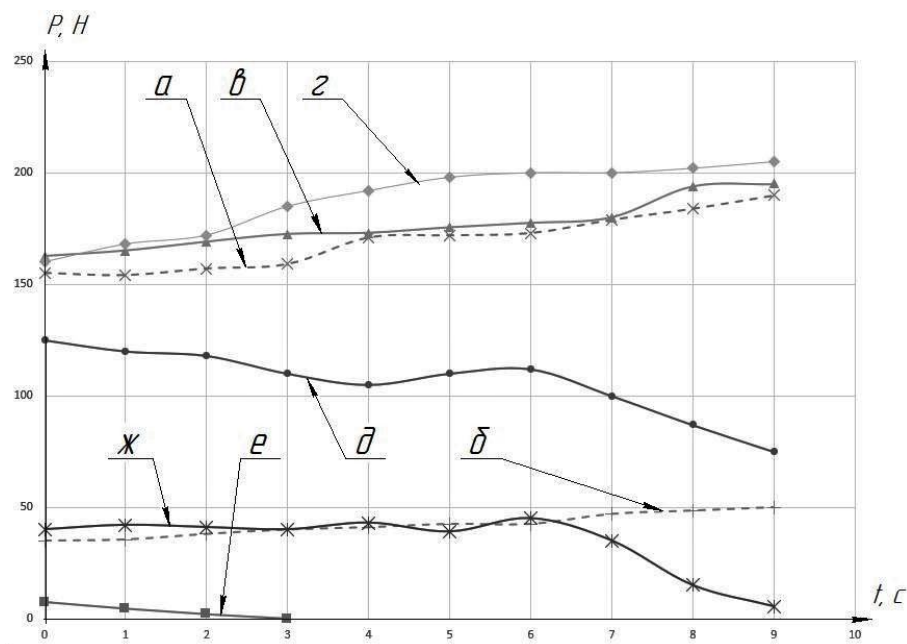


Рис. 8. Экспериментальные значения максимальной возмущающей нагрузки  $P$  для различных вариантов движения в соответствии с поставленной задачей

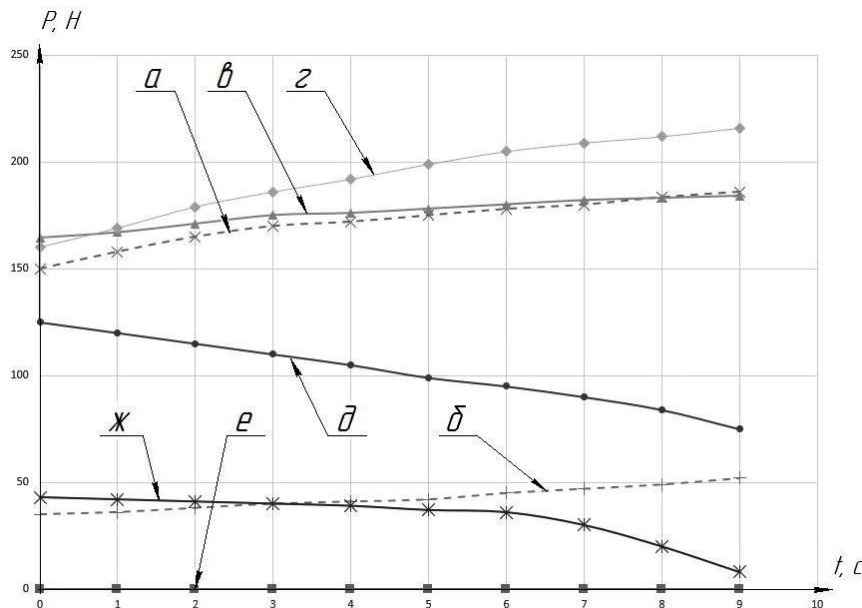


Рис. 9. Расчетные значения максимальной возмущающей нагрузки  $P$  для различных вариантов движения в соответствии с поставленной задачей

Как и следовало из математической модели, для более устойчивых конфигураций (варианты движения  $a, б, з, д$ ) максимальная возмущающая нагрузка оказалась выше, чем для остальных, менее устойчивых конфигураций, на всех этапах перемещения. При этом расчетные значения максимальной возмущающей нагрузки качественно соответствуют полученным экспериментальным данным (рис. 9).

Проведенное исследование подтверждает работоспособность предложенного способа перемещения по вертикальной поверхности. Ожидаемое поведение тросового робота, исходя из анализа его математической модели, соответствует полученным экспериментальным данным, что подтверждает ее адекватность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калинин, Л. Н. Кравчук. – М.: Наука, 2001. – 369 с.
2. Silva, M. A survey of technologies for climbing robots adhesion to surfaces / M. Silva, J. Machado, J. Tar // Proc. of the 6th IEEE Conference on Computational Cybernetics, November 27–29, 2008, Stara Lesna, Slovakia. – Pp. 127–132.
3. Nansai, S.; Mohan, R. E. A Survey of Wall Climbing Robots: Recent Advances and Challenges / S. Nansai, R. E. Mohan // Robotics. – 2016, 5, 14.
4. Шаронов, Н. Г. О перемещении по вертикальной шероховатой поверхности с помощью тросовых движите-

лей / Н. Г. Шаронов, М. И. Ефимов // Известия ВолГТУ : научный журнал № 3 (226) / ВолГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Роботы мехатроника и робототехнические системы»). – С. 51–54.

5. Ефимов, М. И. О рациональном проектировании тросового робота вертикального перемещения / М. И. Ефимов, Е. С. Брискин // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021 : материалы XIV мультиконференции : в 4 т. Дивноморское, Геленджик, 27 сентября – 2 октября 2021 года. – Ростов н / Д : Южный федеральный университет, 2021. – С. 37–40.

6. Прокудин, Г. Ю. Моделирование и прототипирование тросового робота для очистки фасада и окон / Г. Ю. Прокудин // XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области. Волгоград, 16–28 ноября 2021 г. : Сборник материалов конференции / ВолГТУ ; редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]. – Волгоград, 2022. – С. 219–220.

7. Some problems of controlling the cable propulsion devices of mobile robots / E. S. Briskin, N. G. Sharonov, M. I. Efimov [et al.] // Robots in Human Life- Proceedings of the 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2020 : 23rd, Moscow, 24–26 августа 2020 года. – Moscow, 2020. – P. 321–328. – DOI 10.13180/clawar.2020.24-26.08.36.

8. Пат. на полезную модель № 201924 У1 Российская Федерация, МПК E04G 23/00. Тросовый робот вертикального перемещения / Е. С. Брискин, М. И. Ефимов, Н. Г. Шаронов ; заявитель Волгоград. гос. техн. ун-т. – № 2020134938 ; заявл. 26.10.2020 ; опубл. 21.01.21.

9. Ефимов, М. И. Об усилиях, действующих на тросовый робот, перемещающийся по ровной вертикальной поверхности / М. И. Ефимов // Известия ВолГТУ : научный журнал № 4(263) / ВолГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – 2022. – С. 31–37.

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5  
DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-34-42

*А. В. Леонард*

**ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНОГО РОБОТА  
С ОБХОДОМ СТАЦИОНАРНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ ПРИ ЗАДАННЫХ:  
НАЧАЛЬНЫХ И КОНЕЧНЫХ КООРДИНАТАХ,  
СКОРОСТЯХ И ОПЕРАТИВНОМ ВРЕМЕНИ (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>).  
Ч. I. ТЕОРИЯ**

**Волгоградский государственный технический университет**

Alex-Leonard@yandex.ru

В статье рассматривается вопрос разработки метода оптимального планирования движения робота с обходом препятствия при заданных краевых условиях и времени движения (BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>). Предлагаемый подход планирования движения (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>) основывается на совместном применении вариационного исчисления (VC) и метода потенциальных полей (APF) с разделением планирования на этапы (режимы движения).

*Ключевые слова:* мобильный робот, планирование движения, вариационное исчисление, метод потенциальных полей, оптимальное управление.

*A. V. Leonard*

**MOTION PLANNING OF A GROUND ROBOT WITH BYPASSING A STATIONARY  
OBSTACLE AT THE SPECIFIED: INITIAL AND END COORDINATES,  
SPEEDS AND OPERATING TIME (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>).  
Part I. THEORY**

**Volgograd State Technical University**

The article deals with the issue of developing the method for optimal planning of the robot's motion with an obstacle avoidance for given boundary conditions and motion time (BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>). The proposed approach (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>) to traffic planning is based on the joint application of the variational calculus (VC) and the artificial potential field (APF) method with the division of planning into stages (traffic modes).

*Keywords:* mobile robot, motion planning, calculus of variations, artificial potential field method (APF), optimal control.

**Введение**

Современный уровень состояния технологий (в области управления техникой, транспорта, производства малогабаритных высокоскоростных вычислительных систем, сенсоров и измерительных приборов и т. д.), изменение цивилизационной парадигмы современного общества обуславливают потребность в разработке и создании беспилотных транспортных средств и систем. Решение проблемы по созданию оптимальных методов управления беспилотными транспортными средствами и системами позволит эффективно осуществлять грузоперевозки, управлять транспортными потоками – экономить время и энергетические ресурсы, снизить количество аварийных ситуаций на дорогах и уровень рисков на опасных производствах и в других сферах деятельности человека. Из анализа обзорных статей [1–3] следует, что на сегодняшний день существует большое разнообразие методов планирования движения робо-

тов, которые отличаются эффективностью в различных условиях (см. табл. 1, [2]).

Исходя из оценки автора статьи [2], наиболее эффективными являются методы потенциальных полей и реактивные методы. Данные методы обеспечивают наибольшее быстродействие робота, пригодны для обхода как статических, так и динамических препятствий, производят гладкую (безударную) траекторию и могут быть использованы как для глобального, так и для локального планирования пути в условиях изменяющейся среды. Но реактивные методы не обладают достаточной строгостью математического обоснования, что затрудняет их анализ известными математическими методами. Методы потенциальных полей строятся на введении функции потенциальной энергии, состоящей из двух компонент: компоненты притяжения к целевой (финальной) точке и компоненты отталкивания от препятствия [4, 5], которые (во многих работах) определяются за-

висимыми только от координат (что заранее предопределяет равенство нулю скорости центра масс робота в финальной точке). На практике могут возникать различные задачи (стыковка двух роботов в процессе движения, перехват роботом цели и др.), в которых робот должен оказаться за отведенное время в конечной точке с требуемым значением скорости. Так как

применение методов потенциальных полей для решения подобных задач приведет к усложнению вида функции потенциальной энергии, то возникает целесообразность в разработке подходящего метода со схожей эффективностью, что и у «классических» методов потенциальных полей. Для этого в первом приближении ставится и решается следующая модельная задача.

Таблица 1

Сравнение методов планирования движения

Методы	Соответств. реальному времени	Тип среды	Характер пути	Сфера действия
На основе графа или дерева	Нормально	Статический	Негладкий	Глобальная
На основе клеточной декомпозиции	Нормально	Статический	Негладкий	Любая
Метод потенциальных полей	Лучше	Любой	Гладкий	Любая
Оптимизационные	Хорошо	Любой	Гладкий	Любая
Интеллектуальные	Плохо	Статический	Негладкий	Глобальная
Реактивные	Лучше	Любой	Гладкий	Любая

**1. Постановка задачи.** Требуется получить законы движения центра масс наземного робота (движущегося по плоскому горизонтальному основанию без сил сопротивления), которые обеспечивают его перемещение из заданной начальной точки  $O$  в конечную  $F$  за отведенное время  $\tau$  при заданных начальных и конечных координатах, скоростях соответственно:  $x_0, \dot{x}_0, y_0, \dot{y}_0; x_\tau, \dot{x}_\tau, y_\tau, \dot{y}_\tau$ , с обходом одного покоещегося препятствия (рис. 1). При этом полагается, что робот обладает идеальной маневренностью – способен реализовать любую траекторию движения центра масс как угодно быстро (отсутствуют конструктивные ограничения шасси и ограничения мощности приво-

дов). Для осуществления корректировки своего движения вблизи препятствий робот должен быть оснащен сенсорами. Так как сенсоры имеют определенную дальность действия, то движение робота может быть разделено на три режима: 1 – сенсоры робота не фиксируют наличие препятствия (глобальное планирование движения); 2 – сенсоры обнаруживают препятствие (локальное планирование движения); 3 – препятствие оказывается «позади» робота (глобальное планирование движения).

**2. Режим при видимом отсутствии препятствия (глобальное планирование движения).** В первом режиме, при свободном движении центра масс робота (в отсутствии видимости сенсорами препятствия) для выполнения граничных условий:  $x_0, \dot{x}_0, y_0, \dot{y}_0; x_\tau, \dot{x}_\tau, y_\tau, \dot{y}_\tau$ , математические зависимости, описывающие его законы движения, должны содержать минимум восемь констант. В соответствии с действием по Гамильтону, искомые законы движения можно определять исходя из критерия

$$I = \int_0^\tau L(t, x, y, \dot{x}, \dot{y}) dt, \quad L = T \tag{1}$$

и условий Эйлера – Пуассона, обеспечивающих экстремум (минимальность) для (1):

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0, \quad i = 1, 2, \quad q_1 = x, \quad q_2 = y, \tag{2}$$

$$L = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{m\dot{y}^2}{2}.$$

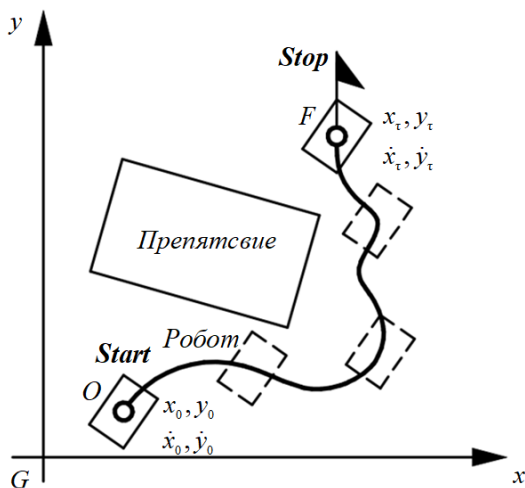


Рис. 1. Постановка задачи

Но законы движения после интегрирования уравнений (2)

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= 0, \quad \dot{x} = A_1, \quad x = A_1 t + A_2, \\ \ddot{y} &= 0, \quad \dot{y} = B_1, \quad y = B_1 t + B_2\end{aligned}\quad (3)$$

содержат всего четыре константы, что не позволяет решить задачу в описанной постановке. Для решения подобной задачи необходимо отойти от классического описания критерия (1) и ввести в него ускорения [6], например:

$$\begin{aligned}I &= \int_0^{\tau} L(t, x, y, \dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}) dt, \\ L &= \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{m\dot{y}^2}{2} + \frac{k_a \ddot{x}^2}{2} + \frac{k_a \ddot{y}^2}{2}.\end{aligned}\quad (4)$$

Тогда для обеспечения экстремальности (минимальности) критерия (4) должны выполняться условия:

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}_i} \right) = 0. \quad (5)$$

Откуда, искомые законы движения в дифференциальной форме примут вид:

$$x^{(IV)} - \frac{m}{k_a} \ddot{x} = 0, \quad y^{(IV)} - \frac{m}{k_a} \ddot{y} = 0, \quad (6)$$

где  $k_a > 0$  – размерный коэффициент пропорциональности.

Поиск решения первого уравнения (6) через подстановку  $x = e^{rt}$  приводит к определению вида закона движения робота вдоль оси абсцисс:

$$\begin{aligned}x^{(IV)} - k^2 \ddot{x} &= 0, \quad k = \sqrt{\frac{m}{k_a}}, \\ r^4 - k^2 r^2 &= 0, \quad r^2 (r^2 - k^2) = 0, \\ r_{1,2} &= 0, \quad r_3 = k, \quad r_4 = -k, \\ x &= C_{11} + C_{12} t + C_{13} e^{kt} + C_{14} e^{-kt}.\end{aligned}\quad (7)$$

После интегрирования второго уравнения (6) аналогичным образом (7) законы движения робота описываются соотношениями [7]:

$$\begin{aligned}q_1 &= C_{11} + C_{12} t + C_{13} e^{kt} + C_{14} e^{-kt}, \\ q_2 &= C_{21} + C_{22} t + C_{23} e^{kt} + C_{24} e^{-kt}.\end{aligned}\quad (8)$$

Подстановка начальных и конечных условий движения робота в систему (8) позволяет определить неизвестные константы  $C_{ij}$ , тем самым – решить задачу движения робота в отсутствии препятствия и при этом оптимально:

$$\begin{cases} C_{i1} + C_{i3} + C_{i4} = q_{i0}, \\ C_{i1} + C_{i2} \tau + C_{i3} e^{k\tau} + C_{i4} e^{-k\tau} = q_{i\tau}, \\ C_{i2} + C_{i3} k - C_{i4} k = \dot{q}_{i0}, \\ C_{i2} + C_{i3} k e^{k\tau} - C_{i4} k e^{-k\tau} = \dot{q}_{i\tau}, \end{cases} \quad \begin{cases} C_{i1} = q_{i0} - C_{i3} - C_{i4}, \\ q_{i0} - C_{i3} - C_{i4} + C_{i2} \tau + C_{i3} e^{k\tau} + C_{i4} e^{-k\tau} = q_{i\tau}, \\ C_{i2} + C_{i3} k - C_{i4} k = \dot{q}_{i0}, \\ C_{i2} + C_{i3} k e^{k\tau} - C_{i4} k e^{-k\tau} = \dot{q}_{i\tau}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_{i1} = q_{i0} - C_{i3} - C_{i4}, \\ C_{i2} = \frac{1}{\tau} [q_{i\tau} - q_{i0} + C_{i3} (1 - e^{k\tau}) + C_{i4} (1 - e^{-k\tau})], \\ \left[ \frac{1 - e^{k\tau}}{\tau} + k \right] C_{i3} + \left[ \frac{1 - e^{-k\tau}}{\tau} - k \right] C_{i4} = \dot{q}_{i0} - \frac{q_{i\tau} - q_{i0}}{\tau}, \\ \left[ \frac{1 - e^{k\tau}}{\tau} + k e^{k\tau} \right] C_{i3} + \left[ \frac{1 - e^{-k\tau}}{\tau} - k e^{-k\tau} \right] C_{i4} = \dot{q}_{i\tau} - \frac{q_{i\tau} - q_{i0}}{\tau}, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}a_{i11} &= \left[ \frac{1 - e^{k\tau}}{\tau} + k \right], \quad a_{i12} = \left[ \frac{1 - e^{-k\tau}}{\tau} - k \right], \quad a_{i21} = \left[ \frac{1 - e^{k\tau}}{\tau} + k e^{k\tau} \right], \quad a_{i22} = \left[ \frac{1 - e^{-k\tau}}{\tau} - k e^{-k\tau} \right], \\ b_{i1} &= \dot{q}_{i0} - \frac{q_{i\tau} - q_{i0}}{\tau}, \quad b_{i2} = \dot{q}_{i\tau} - \frac{q_{i\tau} - q_{i0}}{\tau}, \quad \begin{cases} a_{i11} C_{i3} + a_{i12} C_{i4} = b_{i1}, \\ a_{i21} C_{i3} + a_{i22} C_{i4} = b_{i2}, \end{cases} \quad \Delta_i = \begin{vmatrix} a_{i11} & a_{i12} \\ a_{i21} & a_{i22} \end{vmatrix} = a_{i11} a_{i22} - a_{i12} a_{i21}, \\ \Delta_{i1} &= \begin{vmatrix} b_{i1} & a_{i12} \\ b_{i2} & a_{i22} \end{vmatrix} = b_{i1} a_{i22} - a_{i12} b_{i2}, \quad \Delta_{i2} = \begin{vmatrix} a_{i11} & b_{i1} \\ a_{i21} & b_{i2} \end{vmatrix} = a_{i11} b_{i2} - b_{i1} a_{i21},\end{aligned}\quad (10)$$

при условии:

$$\Delta_i = \left[ \frac{1 - e^{k\tau}}{\tau} + k \right] \left[ \frac{1 - e^{-k\tau}}{\tau} - k e^{-k\tau} \right] - \left[ \frac{1 - e^{-k\tau}}{\tau} - k \right] \left[ \frac{1 - e^{k\tau}}{\tau} + k e^{k\tau} \right] \neq 0, \quad C_{i3} = \frac{\Delta_{i1}}{\Delta_i}, \quad C_{i4} = \frac{\Delta_{i2}}{\Delta_i}. \quad (11)$$

Если сенсоры в некоторый момент времени  $\tau_1$  от начала движения все-таки обнаруживают препятствие на своем пути, то законы движения должны видоизмениться, отражая своей записью и параметрами форму робота, форму и расположение препятствия, способность уклонения от границ препятствия. На основе соответствующих алгоритмов обработки массива данных (координат точек границ препятствий), поступающих от сенсоров, каждому из обнаруженных препятствий и для простоты реализации управления может быть поставлена в соответствие окружность радиусом  $R_i$  и координатами центра  $x_i, y_i$ . В свою очередь, границы самого робота можно разместить внутри окружности радиуса  $R$  или вписать в нее. Описание робота и препятствия в виде окружностей является простым способом (используются всего три пара-

метра: радиус, две координаты) и позволяет снизить риск попадания робота в локальный минимум потенциального поля [8]. Идентификация препятствий представляет собой отдельную задачу, которая в данной статье не рассматривается.

**3. Режим уклонения от препятствия (локальное планирование движения).** Для отыскания вида законов движения центра масс робота, учитывающих наличие препятствия и его безударный обход, предлагается ввести интегральный критерий типа (использовать классическое действие по Гамильтону):

$$I = \int_{\tau_1}^{\tau_2} L(t, x, y, \dot{x}, \dot{y}) dt, \quad L = T - U_{obstact}, \quad (12)$$

где  $T$  – кинетическая энергия центра масс робота;  $U_{obstact}$  – функция потенциальной энергии искусственного силового поля отталкивания от границ препятствия.

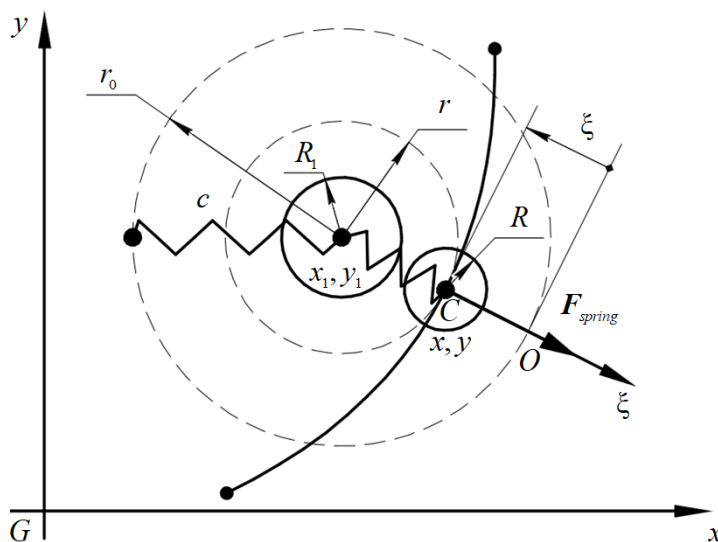


Рис. 2. Определение вида функции потенциальной энергии

Из физической особенности функционирования сенсоров робота (ограниченной дальности их действия) следует, что функцию  $U_{obstact}$  можно описать силовым полем отталкивания, ограниченного в пространстве действия. В качестве источника такого поля может выступать условная (виртуальная) пружина с жесткостью  $c > 0$ , сжимаемая роботом, который приближается к границам препятствия. При сжатии условной пружины возникает сила отталкивания  $F_{spring}$ , что проиллюстрировано на рис. 2. По-

тенциальная энергия пружины – отталкивающего поля препятствия – определяется исходя из выражения:

$$U_{obstact} = \frac{c\xi^2}{2}, \quad \xi = r - r_0,$$

$$U_{obstact} = \frac{c(r - r_0)^2}{2} = \frac{c}{2}(r^2 - 2r \cdot r_0 + r_0^2). \quad (13)$$

Таким образом, с учетом координатной записи для  $r$  получается пространственно ограниченное отталкивающее силовое поле:

$$U_{obstact} = \begin{cases} \frac{c}{2} \left[ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - 2r_0 \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + r_0^2} \right], & r \leq r_0, \\ 0, & r > r_0. \end{cases} \quad (14)$$

**4. Условие безударного обхода препятствия.** Минимальная длина сжатой виртуальной пружины, обеспечивающая отсутствие соударения робота с препятствием, может быть определена из формулы:

$$r_{\min} = R + \alpha_1 R_1, \quad (15)$$

где  $\alpha_1 > 1$  – коэффициент безопасности, определяющий запас дистанции робота до границы препятствия. На границе силового поля  $r_0$  робот обладает кинетической энергией, которая по мере сжатия условной пружины частично или полностью перейдет в потенциальную, при некоторой длине пружины  $r^*$ . Если полагать  $r^* = r_{\min}$ , то условие безударного обхода роботом препятствия в общем виде может быть выражено через закон сохранения энергии:

$$\frac{mV_{\parallel}^2|_{r=r_0}}{2} + \frac{mV_{\perp}^2|_{r=r_0}}{2} = \frac{mV_{\perp}^2|_{r=r_0}}{2} \frac{r_0^2}{r_{\min}^2} + \frac{c}{2} (r_{\min}^2 - 2r_{\min} \cdot r_0 + r_0^2). \quad (18)$$

Откуда определяется жесткость условной пружины, необходимая для остановки робота в

$$c = m \left( V^2|_{r=r_0} - V_{\perp}^2|_{r=r_0} \frac{r_0^2}{[R + \alpha_1 R_1]^2} \right) / \left( [R + \alpha_1 R_1]^2 - 2[R + \alpha_1 R_1] \cdot r_0 + r_0^2 \right). \quad (19)$$

Граница поля –  $r_0$  – может быть экспертно задаваемой исходя, например, из условия:

$$R + \alpha_1 R_1 < r_0 \leq r_L + R_1, \quad (20)$$

где  $r_L$  – максимальная дальность обнаружения

$$T(\mathbf{V}_{\parallel}|_{r=r_0}) + T(\mathbf{V}_{\perp}|_{r=r_0}) = T(\mathbf{V}_{\perp}|_{r=r_{\min}}) + U_{obstact}|_{r=r_{\min}}, \quad (16)$$

где  $\mathbf{V}_{\parallel}|_{r=r_0}$  – компонент вектора скорости центра масс робота, направленный к центру препятствия в момент его входа в поле отталкивания;  $\mathbf{V}_{\perp}|_{r=r_0}$  – компонент вектора скорости центра масс робота, направленный перпендикулярно к линии, соединяющей центр масс робота и центр препятствия, в момент его входа в поле отталкивания. Так как для движения механической системы в центральном поле сохраняется момент импульса относительно центра поля:

$$r_0 m V_{\perp}|_{r=r_0} = r m V_{\perp}|_{r=r(t)}, \quad (17)$$

то условие (16) с учетом (17), (15) и (13) представимо в следующем виде:

направлении к центру препятствия на допустимом расстоянии до него:

препятствия сенсорами робота, или определяться из некоторого дополнительного условия.

В координатной форме выражение (19) примет вид:

$$c = m \frac{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2 - (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2) \sin^2 \left[ \arctg \left( \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right) - \arctg \left( \frac{\dot{y}_0}{\dot{x}_0} \right) \right] \frac{r_0^2}{[R + \alpha_1 R_1]^2}}{[R + \alpha_1 R_1]^2 - 2[R + \alpha_1 R_1] \cdot r_0 + r_0^2} \quad (21)$$

**5. Уравнения движения робота в режиме уклонения от препятствия.** Для обеспечения минимума функционала (12) необходимо, чтобы

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0, \quad q_1 = x, \quad q_2 = y, \quad i = 1, 2,$$

$$L = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{m\dot{y}^2}{2} - \frac{c}{2} \left[ (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 - 2r_0 \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} + r_0^2 \right]. \quad (22)$$

Тогда уравнения движения в дифференциальной форме для робота, находящегося в режиме уклонения от препятствия, примут вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{c}{m} \left[ (x - x_1) - r_0 \left[ (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \right]^{-0.5} (x - x_1) \right], \\ \ddot{y} = -\frac{c}{m} \left[ (y - y_1) - r_0 \left[ (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \right]^{-0.5} (y - y_1) \right], \end{cases} \quad (23)$$

где  $c$  определяется исходя из формулы (21).



**6. Пример алгоритма навигации системы управления робота.**

1. Запускается система управления робота и сканирования местности, вводятся оператором начальные:  $x_0, \dot{x}_0, y_0, \dot{y}_0$  и конечные:  $x_\tau, \dot{x}_\tau, y_\tau, \dot{y}_\tau$  условия движения робота и его параметры (рис. 3, а).

2. Робот планирует свое движение – запускается расчет параметров (7), (9)–(11) на основании заданных краевых условий с последующим расчетом законов движения (8) и управляющих воздействий (рис. 3, а).

3. Робот начинает (продолжает) свое движение – реализует синтезированные законы (8) (рис. 3, б).

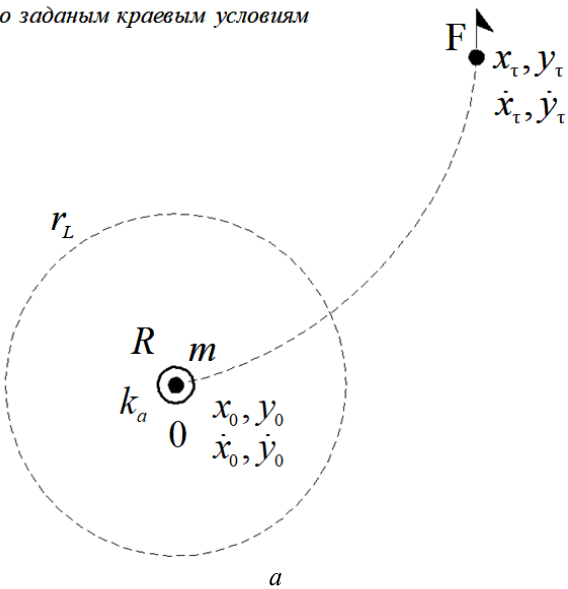
4. В процессе движения, при обнаружении препятствия, производится идентификация препятствия в виде окружности  $(R_1, x_1, y_1)$  и расчет радиуса  $r_{\min}$  опасной зоны вокруг этого препятствия по формуле (15) (рис. 3, б).

5. Производится проверка пересечения синтезированной, в соответствии с (8), траектории робота и опасной зоны вокруг препятствия по условию:

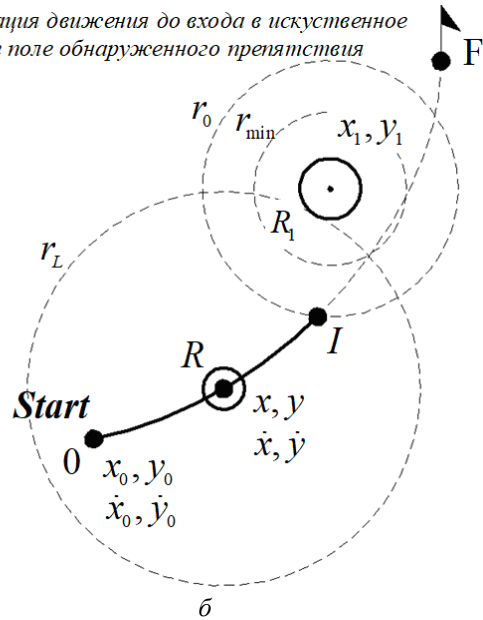
$$\forall t \in [0, \tau]: \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \geq r_{\min}. \quad (24)$$

5.1 Если условие (24) выполняется, то робот продолжает свое движение по законам (8).

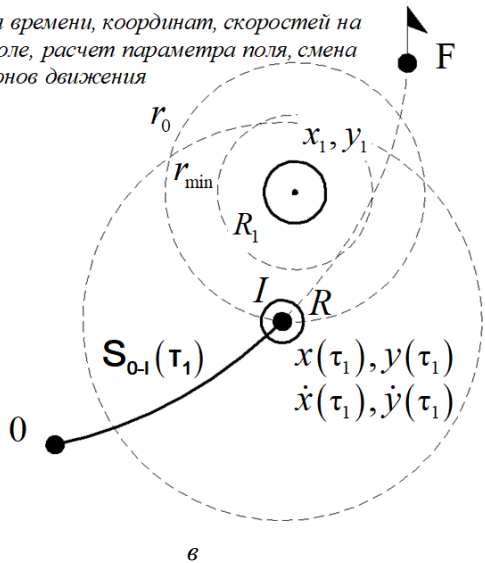
Планирование движения без препятствия по заданным краевым условиям



Реализация движения до входа в искусственное силовое поле обнаруженного препятствия



Фиксация времени, координат, скоростей на входе в поле, расчет параметра поля, смена вида законов движения



Фиксация времени, координат, скоростей на выходе из поля, смена вида законов движения

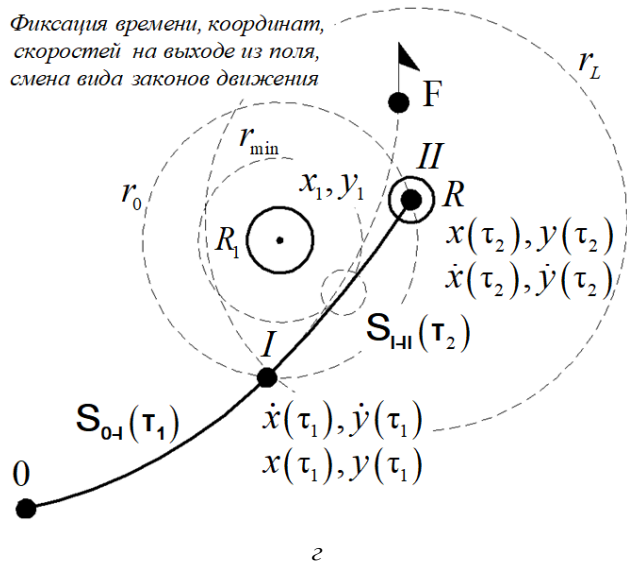
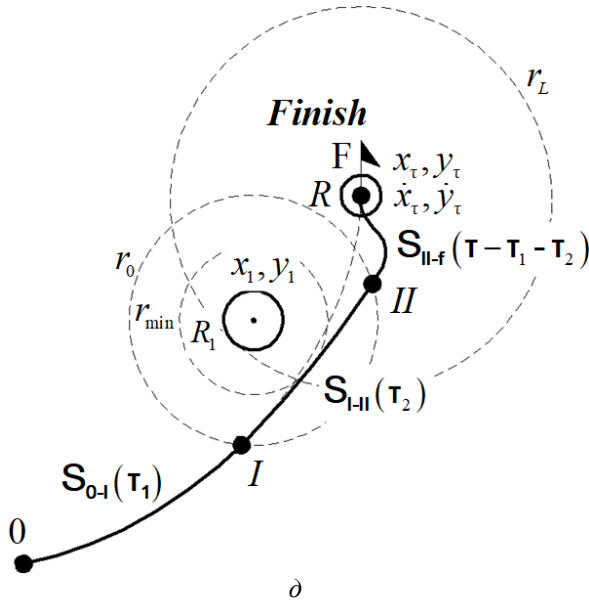


Рис. 3. Обход роботом стационарного препятствия (см. также с. 40)



Планирование движения (определение констант интегрирования) и его реализация по законам:

$$\begin{cases} x_{0-I} = C_{11} + C_{12}t + C_{13}e^{kt} + C_{14}e^{-kt}, \\ y_{0-I} = C_{21} + C_{22}t + C_{23}e^{kt} + C_{24}e^{-kt} \end{cases} \quad (\text{Рис. а, б, в})$$

$$\begin{cases} \ddot{x}_{I-II} = -\frac{c}{m} \left[ (x-x_1) - l_0 \left[ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 \right]^{-0.5} (x-x_1) \right], \\ \ddot{y}_{I-II} = -\frac{c}{m} \left[ (y-y_1) - l_0 \left[ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 \right]^{-0.5} (y-y_1) \right], \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{II-F} = \tilde{C}_{11} + \tilde{C}_{12}t + \tilde{C}_{13}e^{\tilde{k}t} + \tilde{C}_{14}e^{-\tilde{k}t}, \\ y_{II-F} = \tilde{C}_{21} + \tilde{C}_{22}t + \tilde{C}_{23}e^{\tilde{k}t} + \tilde{C}_{24}e^{-\tilde{k}t} \end{cases} \quad (\text{Рис. д})$$

Рис. 3. Окончание

5.2 Если условие (24) не удовлетворяется, то выполняются действия: 6–10.

6. Определяется радиус  $r_0$  окружности (20) – границы действия искусственного силового поля отталкивания (рис. 3, б).

7. Для момента времени  $\tau_1$ , соответствующего пересечению траекторией робота (8) границы поля отталкивания  $r_0$  (входу робота в поле):

$$\sqrt{(x(\tau_1) - x_1)^2 + (y(\tau_1) - y_1)^2} = r_0, \quad (25)$$

производится определение из (8) и сохранение в оперативной памяти робота его координат  $x(\tau_1), y(\tau_1)$  и скоростей  $\dot{x}(\tau_1), \dot{y}(\tau_1)$  (рис. 3, в).

8. Запускается расчет жесткости (21) условной пружины и алгоритм численного интегрирования законов движения (23) (обеспечивающих увод робота от препятствия за область действия силового поля) с начальными – переопределенными условиями:

$$\begin{aligned} x(0) &= x(\tau_1), y(0) = y(\tau_1), \\ \dot{x}(0) &= \dot{x}(\tau_1), \dot{y}(0) = \dot{y}(\tau_1). \end{aligned}$$

9. При повторном пересечении траекторией робота границы поля отталкивания – при выходе робота из поля, фиксируются время  $\tau_2$ , текущие координаты  $x(\tau_2), y(\tau_2)$  и скорости  $\dot{x}(\tau_2), \dot{y}(\tau_2)$  (рис. 3, г).

10. Запускается расчет новых значений параметров (7), (9)–(11) на основании переопределенных краевых условий:

$$x(0) = x(\tau_2), y(0) = y(\tau_2), \dot{x}(0) = \dot{x}(\tau_2),$$

$$\dot{y}(0) = \dot{y}(\tau_2), x(\tau - \tau_2 - \tau_1) = x_\tau,$$

$$y(\tau - \tau_2 - \tau_1) = y_\tau, \dot{x}(\tau - \tau_2 - \tau_1) = \dot{x}_\tau,$$

$$\dot{y}(\tau - \tau_2 - \tau_1) = \dot{y}_\tau,$$

с последующим расчетом и реализацией законов движения (8) (рис. 3, д, е).

Если синтезированный участок траектории проходит вне границы опасной области  $r_{\min}$  (п. 5, 5.1), то цикл построений завершается, иначе (п. 5.2) – происходит возврат к п. 7–10 с необходимым перерасчетом параметров и выбором режима движения наземного робота.

### Заключение

Исходя из анализа статей в русскоязычном сегменте публикаций по запросам (elibrary.ru): «Планирование движения» (1757 статей, 1977–2022 гг.), «Оптимальное движение» (272 стат., 1987–2022 гг.), «Вариационное исчисление и движение» (60 статей, 1987–2022 гг.) и – в англоязычном по запросу в БД Web of Science: «Obstacle avoidance planning» (339 статей, 1985–2022 гг.), можно составить следующую таблицу свойств (табл. 2) предлагаемого подхода планирования движения VC/APF+BC $^I_\tau$  (с учетом краевых условий и лимита времени) в сравнении со свойствами существующих методов потенциальных полей (APF) [9].

Таблица 2

Сравнение предлагаемого подхода с методами APF

№	Существующие методы	Предлагаемый подход
1.	<i>Модификация Лагранжиана</i>	
	Не предлагается модификация. Используются дифференциальные уравнения движения 2-го порядка	В Лагранжиан вводится «кинетическая энергия ускорения». Дифференциальные уравнения движения 4-го порядка
2.	<i>Применение потенциала притяжения в финальной точке</i>	
	Да. Во многих статьях: $U_{att}(\mathbf{q}) = k_a \frac{\ \mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}\ ^2}{2}$	Нет. Достижение финальных координат обеспечивается расчетом констант интегрирования законов движения через краевые условия и оперативное время
3.	<i>Вид функции потенциальной энергии отталкивания</i>	
	Применяется более сложная функция: $U_{rep}(\mathbf{q}) = k_r \frac{(\rho^{-1}(\mathbf{q}) - \rho_0^{-1})^2}{2}, \rho(\mathbf{q}) \leq \rho_0,$ $\rho$ – расстояние между роботом и границей препятствия	Используется более простая запись: $U_{obstac} = \frac{c(r - r_0)^2}{2}, r \leq r_0,$ $r$ — расстояние между роботом и центром препятствия
4.	<i>Возможность задания скорости центра масс робота в финальной точке</i>	
	В отдельных статьях задается через модификацию потенциала притяжения: $U_{att}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \alpha_q \ \mathbf{q}_{goal} - \mathbf{q}\ ^m + \alpha_{\dot{q}} \ \dot{\mathbf{q}}_{goal} - \dot{\mathbf{q}}\ ^n$	Достижение финальной скорости обеспечивается расчетом констант интегрирования законов движения через краевые условия и оперативное время
5.	<i>Представление препятствия в простой форме (в виде окружности)</i>	
	Во многих статьях задается сложная функция границы препятствия	Да. Позволяет снизить риск попадания в локальный минимум потенциального поля
6.	<i>Лимит времени на перемещение робота из начальной точки в конечную.</i>	
	В статьях не указано	Да. Учитывается в константах интегриров
7.	<i>Расчет константы силового поля отталкивания</i>	
	В статьях не представлено	Да. Из законов сохранения энергии и момента импульса для центрального поля
8.	<i>Учет габаритов мобильного робота</i>	
	В статьях не указано	Да. При расчете константы поля
9.	<i>Решение проблемы локальных минимумов поля (потенциальных ям)</i>	
	Изменение направления движения; притяжение ко временной цели; использование полей без локальных минимумов со сложной структурой	Введение временной (промежуточной) конечной точки – временное изменение правой границы исходных краевых условий

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chunxi, Cheng.* Path planning and obstacle avoidance for AUV : A review / Chunxi Cheng, Qixin Sha, Bo He, Guangliang Li // *Ocean Engineering.* – 2021. – Vol. 235. Article 109355.  
 2. *Лю, В.* Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) / В. Лю // *Математика и математическое моделирование.* – 2018. – № 1. – С. 15–58.  
 3. *Казаков, К. А.* Обзор современных методов планирования движения / К. А. Казаков, В. А. Семенов // *Труды ИСП РАН.* – 2016. – Т. 28, вып. 4. – С. 241–294.  
 4. *Платонов, А. К.* Метод потенциалов в задаче прокладки трассы / А. К. Платонов, И. И. Карпов, А. А. Кирильченко. – М., 1974. – 27 с. (Препр. Института прикладной математики АН СССР; № 124).

5. *Khatib, O.* Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots // 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, March 25–28, 1985, St. Louis, pp. 500–505.  
 6. *Леонард, А. В.* О влиянии «характера» группы роботов на их движение / А. В. Леонард, Е. С. Брискин, И. А. Горбов // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (196) / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2017. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 116–120.  
 7. *Леонард, А. В.* Синтез законов движения наземным роботом при обходе стационарного препятствия / А. В. Леонард, И. А. Горбов, С. А. Твердохлебов // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 14 (209) / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2017. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 105–111.

8. Платонов, А. К. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы / А. К. Платонов, А. А. Кирильченко, М. А. Колганов. – М., 2001. – 32 с. (Препр. / Инст. прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН; № 40).

9. Филимонов, А. Б. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 11. – С. 677–685.

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5  
DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-42-48

*А. В. Леонард*

**ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНОГО РОБОТА  
С ОБХОДОМ СТАЦИОНАРНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ ПРИ ЗАДАННЫХ:  
НАЧАЛЬНЫХ И КОНЕЧНЫХ КООРДИНАТАХ, СКОРОСТЯХ  
И ОПЕРАТИВНОМ ВРЕМЕНИ (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>).**

**Ч. II. РЕЗУЛЬТАТЫ**

**Волгоградский государственный технический университет**

Alex-Leonard@yandex.ru

В статье представлены результаты компьютерного моделирования алгоритма навигации наземного робота на основе предложенного подхода планирования движения (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>). Определяется проблема колебаний центра масс робота внутри границ отталкивающего поля препятствия и подтверждается работоспособность указанного подхода.

*Ключевые слова:* мобильный робот, планирование движения, вариационное исчисление, метод потенциальных полей, оптимальное управление, компьютерное моделирование.

*A. V. Leonard*

**MOTION PLANNING OF A GROUND ROBOT WITH BYPASSING A STATIONARY  
OBSTACLE AT THE SPECIFIED: INITIAL AND END COORDINATES,  
SPEEDS AND OPERATING TIME (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>)**

**Part II. COMPUTER SIMULATION**

**Volgograd State Technical University**

The article describes the computer simulation results of the ground robot navigation algorithm based on the proposed motion planning approach (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>). The problem of the robot's mass center fluctuations within the boundaries of the obstacle repulsive field is described and the operability of this approach (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>) is confirmed.

*Keywords:* mobile robot, motion planning, calculus of variations, artificial potential field method (APF), optimal control, computer simulation.

**Введение**

В первой части статьи по результатам анализа широкого спектра публикаций, в том числе [1–9], предложен подход планирования движения мобильного наземного робота на основе:

1) решения плоской вариационной задачи с краевыми условиями по координатам (скоростям);

2) использования только отталкивающего силового поля от границ препятствия (в отличие от классического подхода потенциальных полей);

3) представления робота на плоскости в виде простого геометрического примитива (окружности);

4) адаптации отталкивающего поля за счет пересчета его коэффициента пропорциональности (жесткости) при каждом входе робота с различными скоростями в зону действия поля.

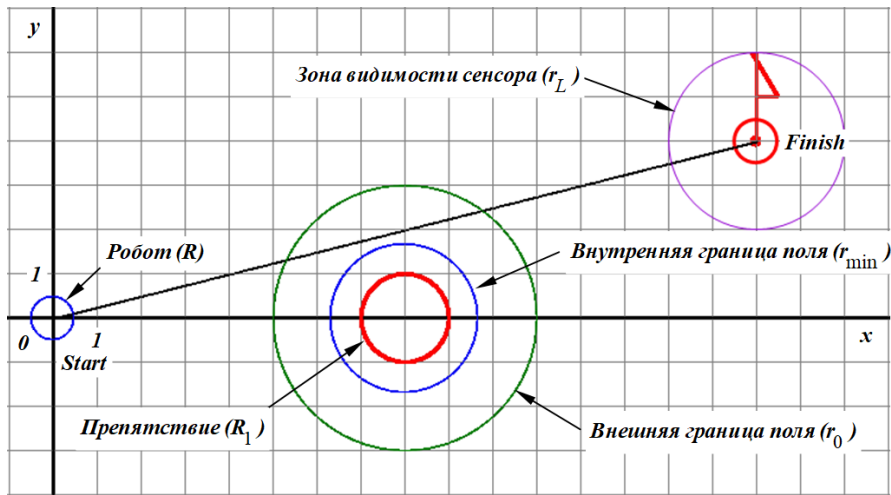
При этом время выполнения задачи роботом ограничено, а на перемещение робота не накладываются ни кинематические (конструктивные), ни динамические (мощность приводов может быть сколь угодно большой) ограничения. Робот обладает идеальной маневренностью. На базе представленного подхода планирования движения описан примерный алгоритм навигации автоматической системы управления роботом.

**1. Компьютерное моделирование.** Для исследования предложенного в первой части статьи примерного алгоритма автоматической навигации мобильного робота (на языке Visual C++ в среде отладки Microsoft Visual Studio 2010) разработан авторский программный инструмент с мультиоконным интерфейсом на основе объектно-ориентированного программирования (классов и механизма их наследова-

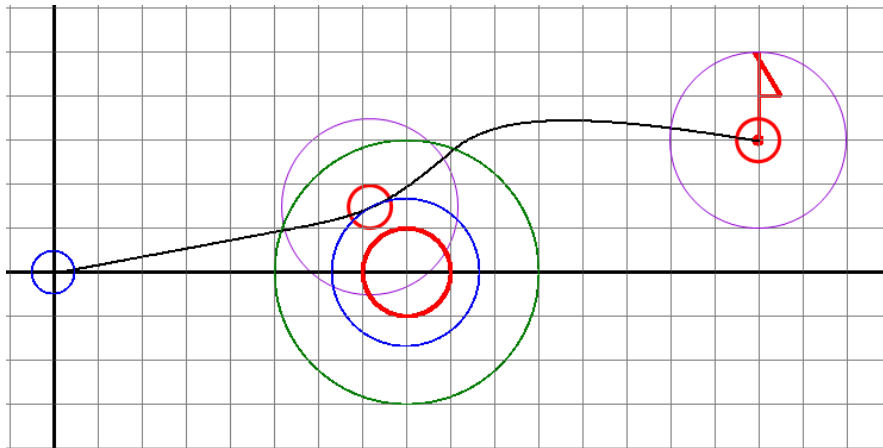
ния). Данный программный инструмент позволяет параллельно рассчитывать кинематику робота; создавать 2D-анимацию его движения в заданном масштабе отображения; визуализировать его траекторию, границу, границы видимости сенсора, препятствия, зону действия отталкивающего поля. Для простоты реализации численного интегрирования в программе ис-

пользован метод численного интегрирования Эйлера.

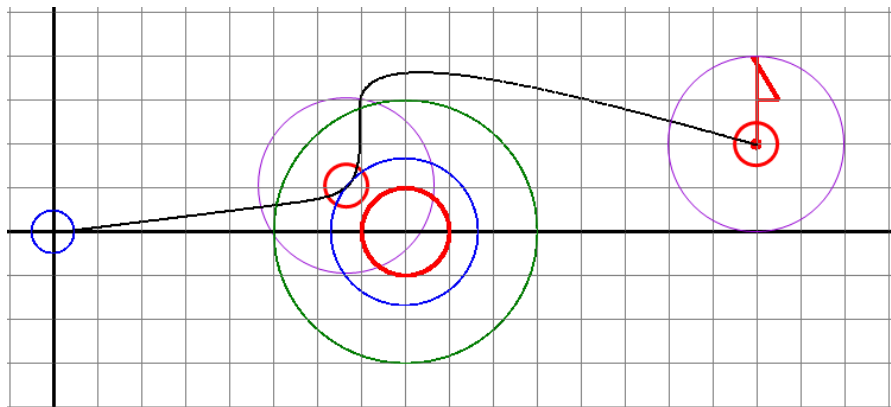
**2. Численное тестирование.** Для всей серии численных экспериментов (рис. 1–5) были приняты постоянными:  $m=1$  кг;  $k_a=1$  кг·с<sup>2</sup>;  $R=0.5$  м;  $r_L=2$  м;  $R_1=1$  м;  $\alpha=1.2$ ;  $\tau=10$  с;  $d\tau=0.02$  с.



а)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_\tau = 116$  м,  $y_\tau = 4$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 0$  м

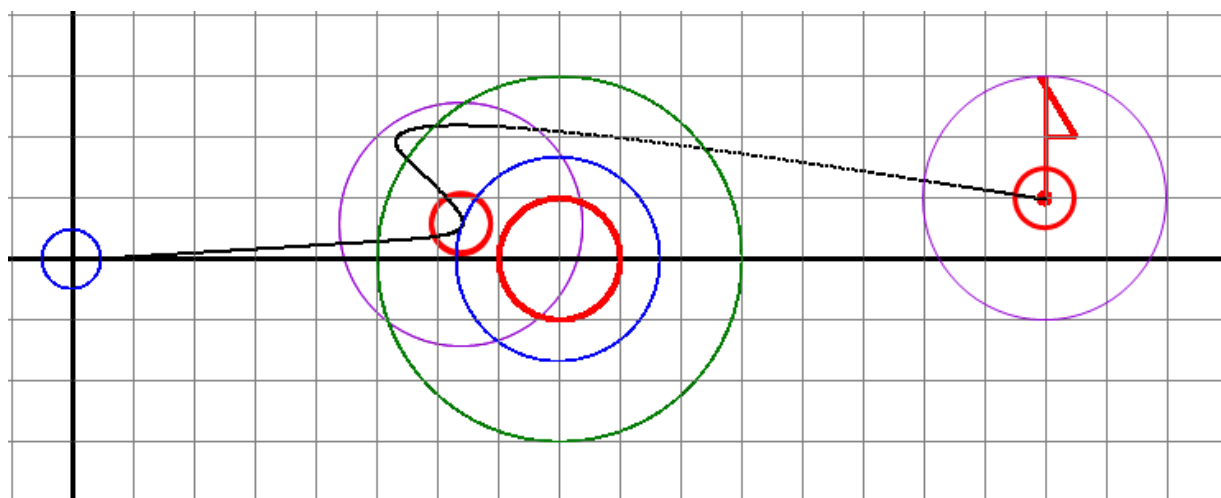


б)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_\tau = 16$  м,  $y_\tau = 3$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 0$  м

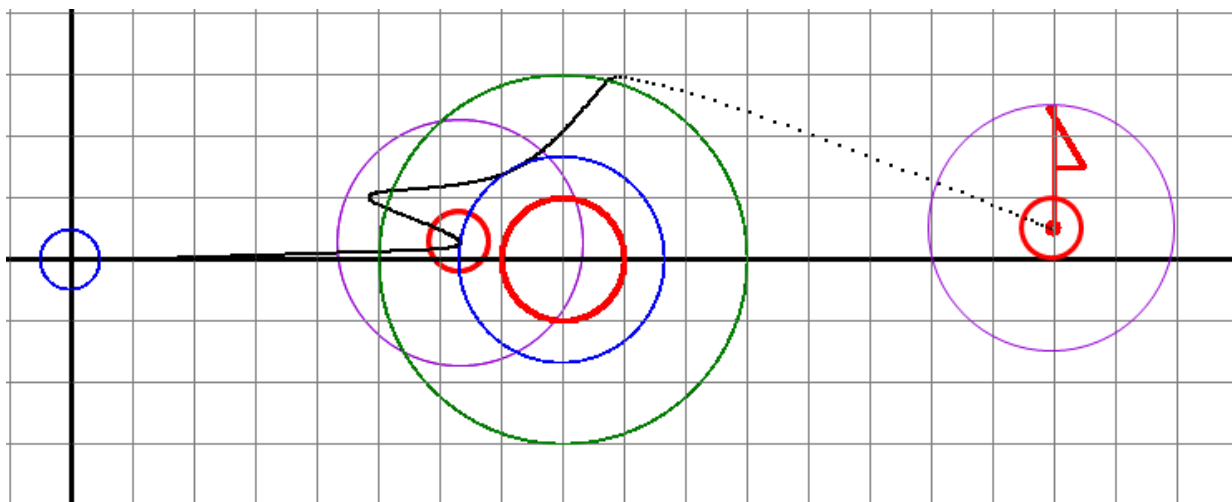


в)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_\tau = 16$  м,  $y_\tau = 2$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 0$  м

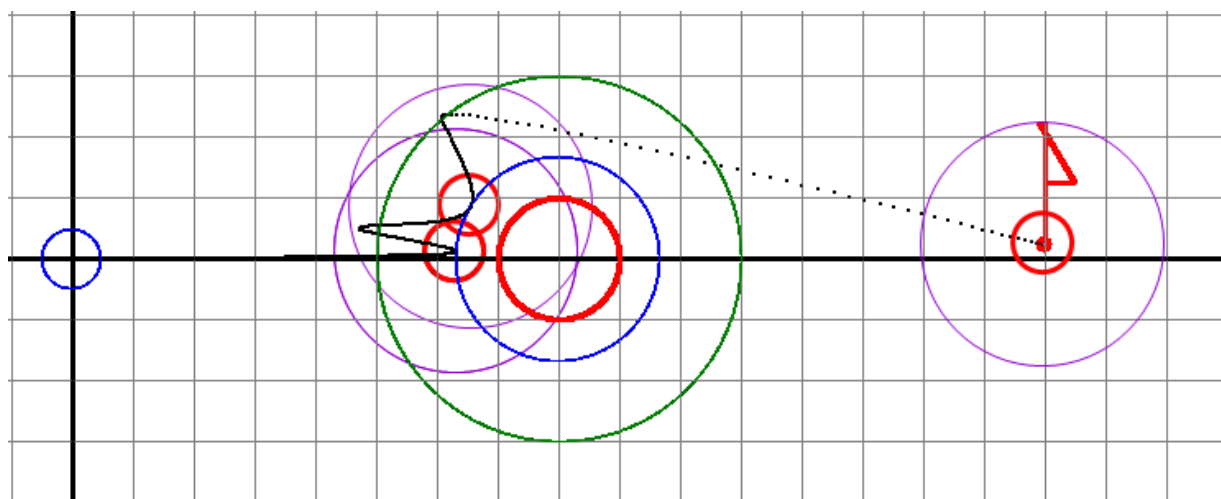
Рис. 1. Результаты численного тестирования при нулевых скоростях в начальной и конечной точках центра масс робота



а)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_\tau = 16$  м,  $y_\tau = 1$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 0$  м

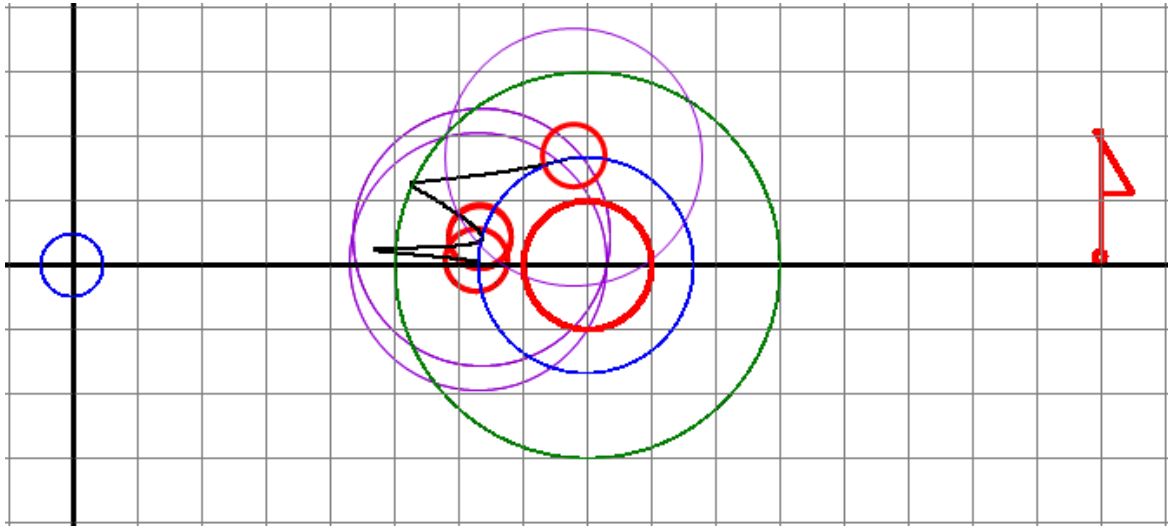


б)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_\tau = 16$  м,  $y_\tau = 0.5$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 0$  м

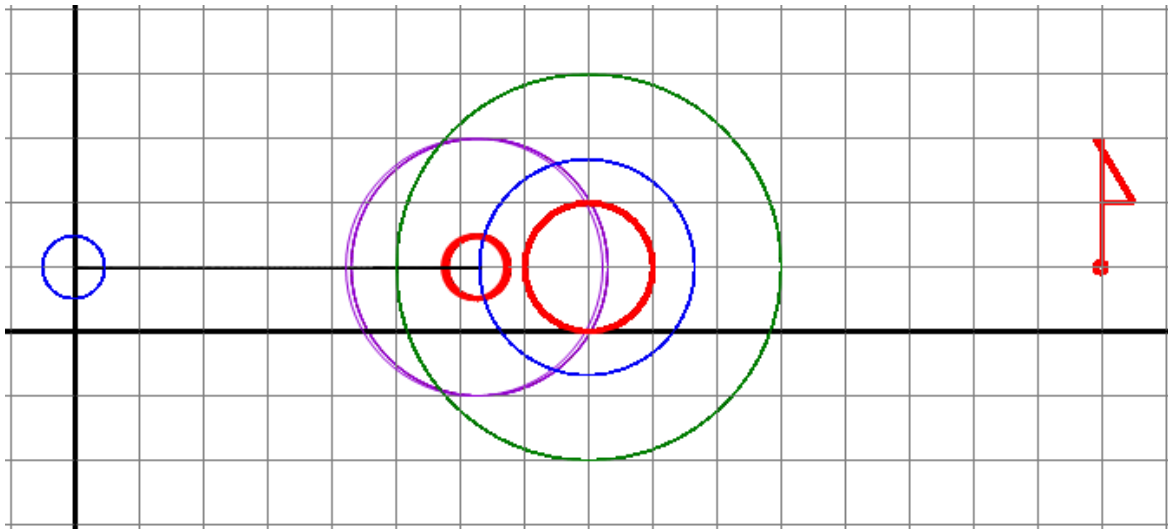


в)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_\tau = 16$  м,  $y_\tau = 0.25$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 0$  м

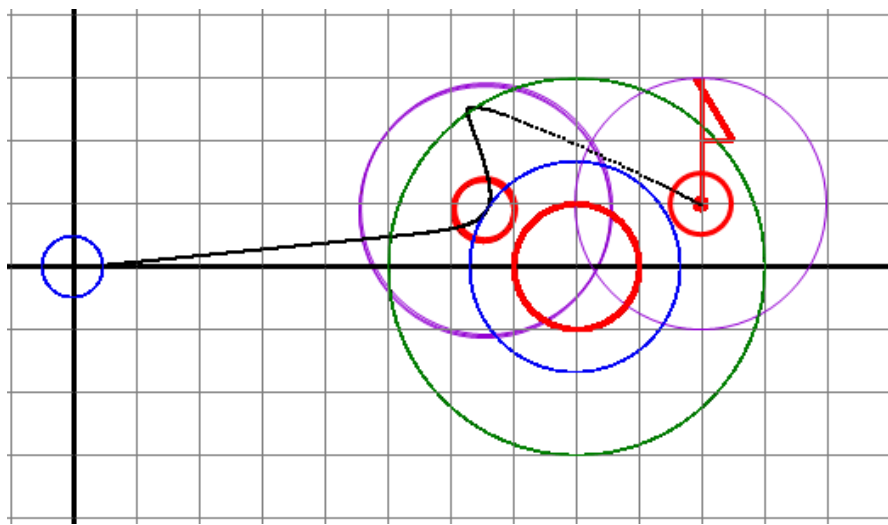
Рис. 2. Результаты численного тестирования при нулевых скоростях в начальной и конечной точках центра масс робота



а)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_t = 16$  м,  $y_t = 0.125$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 0$  м

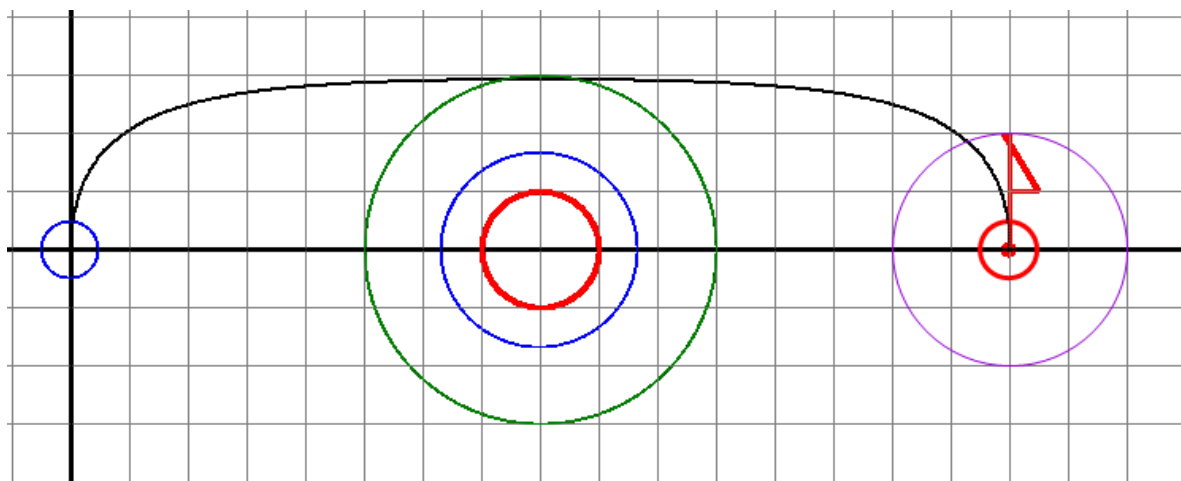


б)  $x_0 = 0$  м,  $y_0 = 1$  м;  $x_t = 16$  м,  $y_t = 1$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 1$  м

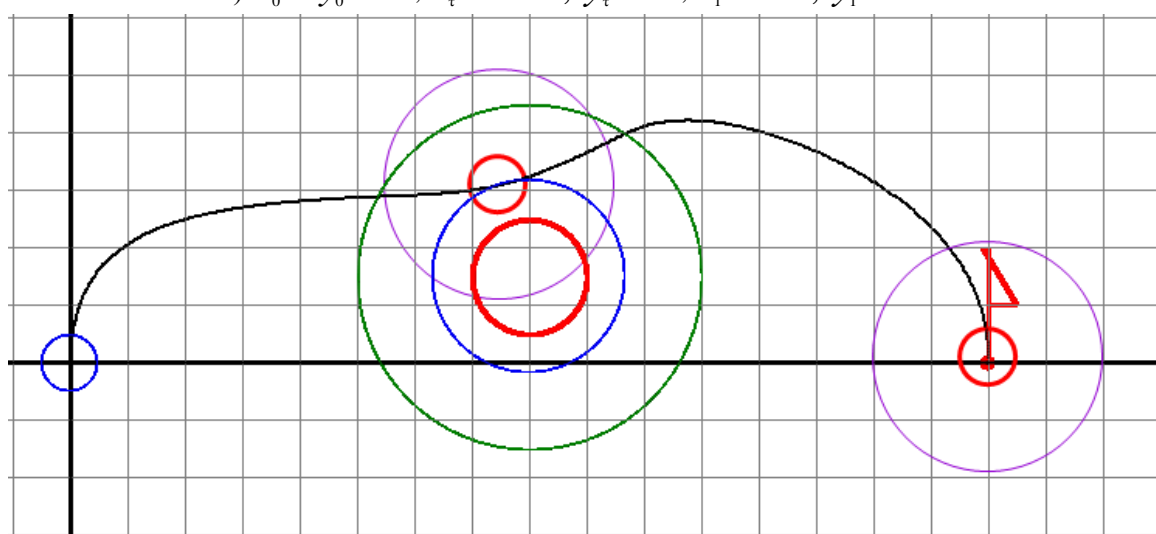


в)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_t = 10$  м,  $y_t = 1$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 0$  м

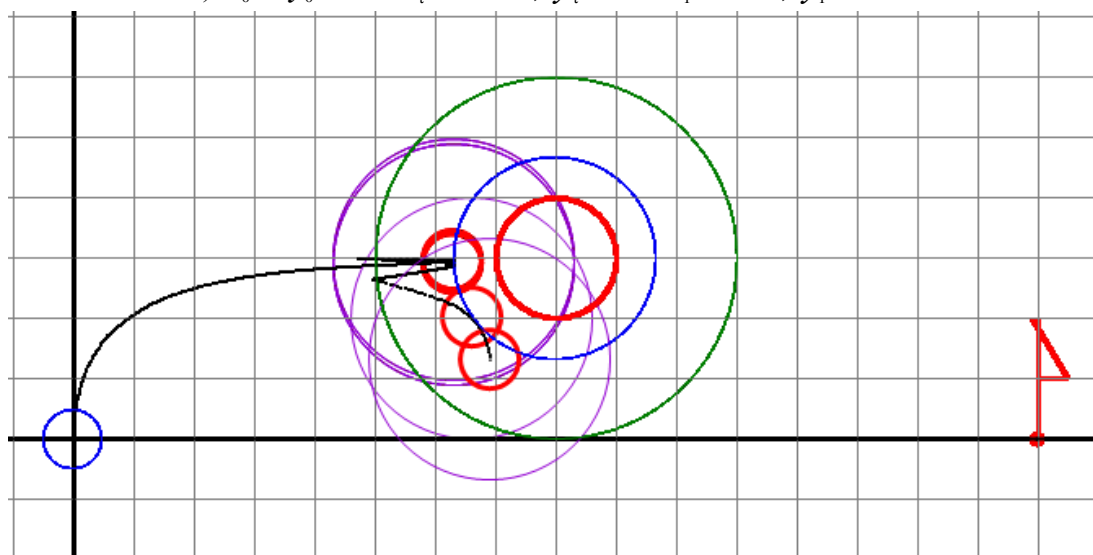
Рис. 3. Результаты численного тестирования при нулевых скоростях в начальной и конечной точках центра масс робота



а)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_\tau = 16$  м,  $y_\tau = 0$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 0$  м



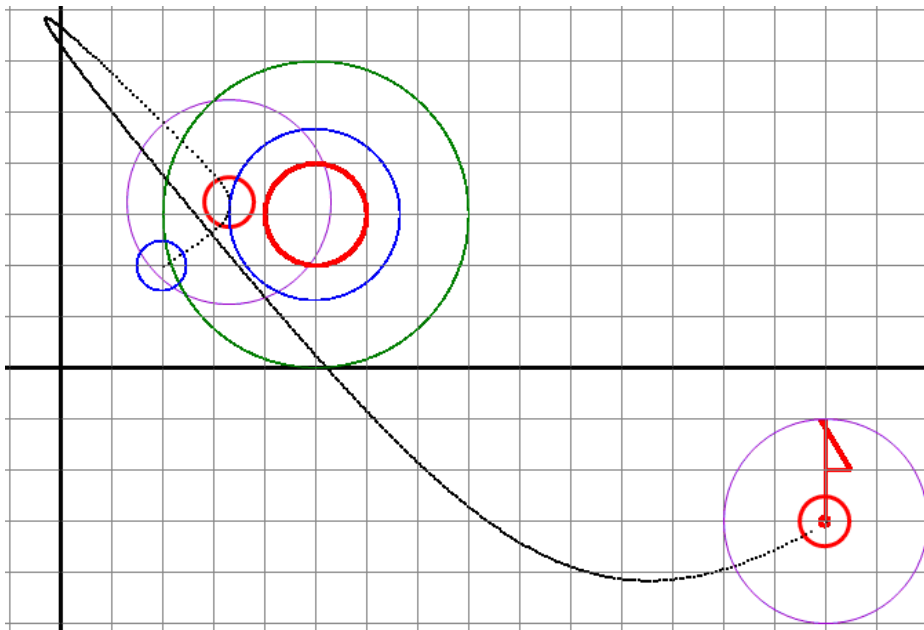
б)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_\tau = 16$  м,  $y_\tau = 0$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 1.5$  м



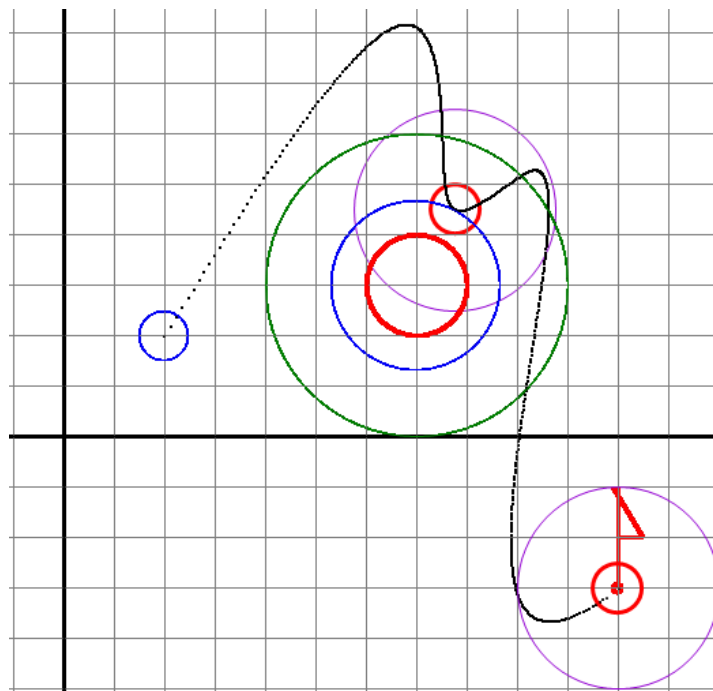
в)  $x_0 = y_0 = 0$  м;  $x_\tau = 16$  м,  $y_\tau = 0$  м;  $x_1 = 8$  м,  $y_1 = 3$  м

Рис. 4. Результаты численного тестирования при скоростях:  
 $\dot{x}_0 = 0$  м/с,  $\dot{y}_0 = 3$  м/с;  $\dot{x}_\tau = 0$  м/с,  $\dot{y}_\tau = -3$  м/с в начальной и конечной точках





а)  $x_0 = y_0 = 2 \text{ м}; \dot{x}_0 = 6 \text{ м/с}, \dot{y}_0 = 4 \text{ м/с}; x_t = 15 \text{ м}, y_t = -3 \text{ м},$   
 $\dot{x}_t = 5 \text{ м/с}, \dot{y}_t = 3 \text{ м/с}; x_1 = 5 \text{ м}, y_1 = 3 \text{ м}$



б)  $x_0 = y_0 = 2 \text{ м}; \dot{x}_0 = 6 \text{ м/с}, \dot{y}_0 = 10 \text{ м/с}; x_t = 11 \text{ м}, y_t = -3 \text{ м};$   
 $\dot{x}_t = 4 \text{ м/с}, \dot{y}_t = 3 \text{ м/с}; x_1 = 7, y_1 = 3$

Рис. 5. Результаты тестирования при произвольном задании скоростей и координат центра масс робота в начальной и конечной точках

**Заключение**

Из анализа рис. 1, а, б, в; рис. 2, а, б, в; рис. 3, а; рис. 4, в следует, что при приближении линии вектора абсолютной скорости центра масс робота к центру препятствия происходит рост

числа касаний (центра робота) внутренней границы отталкивающего от препятствия поля. При некотором малом расстоянии между центром препятствия и линией вектора скорости робот оказывается неспособным прийти в ко-

нечную точку за отведенное время (рис. 3, а). В соответствии с рис. 3, б, когда линия вектора скорости центра масс робота проходит через геометрический центр препятствия, центр масс робота совершает несколько колебательных движений и останавливается на внутренней границе (что определяет возникновение проблемы «минимума потенциальной функции отталкивающего поля препятствия», аналогичной проблеме локальных минимумов методов APF. Однако, в отличие от методов APF), предлагаемый подход VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup> и примерный алгоритм навигации наземного робота позволяют находиться целевой точке робота внутри отталкивающего поля (рис. 3, в). В случае произвольного задания начальных и конечных координат и скоростей центра масс робота моделируемый робот оказывается способным реализовать необходимые законы движения с безударным обходом статичного препятствия за отведенное оперативное время (рис. 4, а, б; рис. 5, а, б). Проблема возникновения колебаний центра масс робота в отталкивающем поле препятствия может быть устранена «отключением» поля (в момент касания роботом внутренней границы поля) и аналитическим решением промежуточной вариационной задачи с временным изменением правой границы исходных краевых условий (определенным введением временной конечной точки). При этом левая граница определяется через координаты точки касания внутренней границы поля центром масс робота с нулевыми значениями скоростей вдоль оси *x* и *y*. Таким образом, работоспособность (применимость) предложенного подхода (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>) подтверждается.

УДК62-526 + 004.932.4

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-48-55

*А. Е. Марков, П. С. Тарасов, А. В. Дианский, А. С. Горобцов*

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ SLAMАЛГОРИТМОВ НА МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЕ

Волгоградский государственный технический университет

markovalex95@gmail.com, tarasradio@mail.ru, scorpion\_energy@mail.ru, vm@vstu.ru

Представлены результаты тестирования SLAMалгоритмов двух типов для лидара и стереокамеры. Тестирование выполнено на мобильной колесной платформе при движении по траекториям различного вида. Анализ проводился для координат объекта и углов ориентации. Результаты показали, что среди протестированных алгоритмов SLAMалгоритм с использованием лидара обладает большей точностью.

*Ключевые слова:* беспилотный автомобиль, SLAM, движение по траектории, техническое зрение.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chunxi, Cheng.* Path planning and obstacle avoidance for AUV : A review / Chunxi Cheng, Qixin Sha, Bo He, Guangliang Li // *Ocean Engineering.* – 2021. – Vol. 235. Article 109355.
2. *Лю, В.* Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) / В. Лю // *Математика и математическое моделирование.* – 2018. – № 1. – С. 15–58.
3. *Казаков, К. А.* Обзор современных методов планирования движения / К. А. Казаков, В. А. Семенов // *Труды ИСП РАН.* – 2016. – Т. 28, вып. 4. – С. 241–294.
4. *Платонов, А. К.* Метод потенциалов в задаче прокладки трассы / А. К. Платонов, И. И. Карпов, А. А. Кирильченко. – М., 1974. – 27 с. (Препр. / Ин-т прикладной математики АН СССР; № 124).
5. *Khatib, O.* Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots // *1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, March 25–28, 1985, St. Louis, pp. 500–505.*
6. *Леонард, А. В.* О влиянии «характера» группы роботов на их движение / А. В. Леонард, Е. С. Брискин, И. А. Горбов // *Известия ВолГТУ : научный журнал № 1 (196) / ВолГТУ.* – Волгоград, 2017. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 116–120.
7. *Леонард, А. В.* Синтез законов движения наземным роботом при обходе стационарного препятствия / А. В. Леонард, И. А. Горбов, С. А. Твердохлебов // *Известия ВолГТУ : научный журнал – № 14 (209) / ВолГТУ.* – Волгоград, 2017. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 105–111.
8. *Платонов, А. К.* Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы / А. К. Платонов, А. А. Кирильченко, М. А. Колганов. – М., 2001. – 32 с. (Препр. / Инст. прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН; № 40).
9. *Филимонов, А. Б.* Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // *Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2019. – Т. 20, № 11. – С. 677–685.

A. E. Markov, P. S. Tarasov, A. V. Dianskiy, A. S. Gorobtsov

## ACCURACY ANALYSIS OF SLAM ALGORITHMS ON MOBILE PLATFORM

Volgograd State Technical University

LiDAR and stereo-camera SLAM testing results are presented. The test is conducted using mobile platform while moving along the different kinds of trajectories. Coordinates and orientation angles were analysed. As the result, LiDAR-based SLAM is more accurate than stereo-camera-based SLAM.

*Keywords:* autonomous car, SLAM, moving along trajectory, computer vision.

Автономное управление мобильными платформами базируется на системах технического зрения, в функции которых входит определение координат платформы. В работе рассматриваются несколько *SLAM* алгоритмов, в функции которых входит нахождение координат и ориентации платформы. *SLAM* алгоритмы исполь-

зованы для двух типов приборов технического зрения – лидар *Velodyne VLP-16* и стереокамера *Stereolabs ZED*.

Исследования проводились на экспериментальной мобильной платформе [1], в которой реализовано управление движением с отслеживанием заданной программной траектории (рис. 1).



Рис. 1. Колесная платформа для экспериментов

Для нахождения координат с помощью систем технического зрения применяются различные алгоритмы – *LOAM (Lidar Odometry and Mapping)* [2], использующий *LIDAR*; *ORB-SLAM 2* [3], использующий моно и стереокамеры, а также камеры глубины; *LSDSLAM* [4], работающий с монокамерами; *RTAB-Map* [5]. Тестирование большого количества *SLAM*-алгоритмов опубликовано на сайте [6] бенчмарка *KITTI* [7, 8].

В данной работе осуществлялось сравнение алгоритмов *LeGO-LOAM* [17] (модификация алгоритма *LOAM*) и проприетарного алгоритма *SLAM* из *ZEDSDK* от компании *Stereolabs* [9].

*LeGO-LOAM* является оптимизацией алгоритма *LOAM* для наземных транспортных средств. Алгоритм основывается на наличии поверхности земли в облаках точек, получаемых с лидара. Это позволяет эффективнее выделять ключевые точки и сопоставлять их на

последовательных кадрах для определения движения. Благодаря этому *LeGO-LOAM* обладает такой же точностью, как и *LOAM*, но меньшими вычислительными затратами, что позволяет использовать его даже на встраиваемых платформах с низкой производительностью.

*ZEDSDK* – набор проприетарного (с закрытым программным кодом) обеспечения для стереокамер от компании *Stereolabs*. *ZEDSDK* позволяет осуществлять такие задачи, как построение карты глубины, облака точек, детектирование объектов и *SLAM*. Алгоритм *SLAM* в *ZEDSDK* неизвестен по причине закрытого ПО.

В данной работе рассматривается движение мобильной платформы по нескольким траекториям и анализ точности нахождения координат платформы и углов ориентации.

Результаты замеров координат и углов ори-

ентации платформы при движении по окружности диаметром 3 м в помещении показаны на рис. 2–4. Помещение представляло собой квадратную комнату со стороной 5 м. Контроль точности отслеживания траектории косвенным образом выполнялся по отклонению замыкания – минимальному значению отклонения траектории от начальной точки. Максимальное отклонение замыкания в заезде, представленном на рис. 2, составило 0,7 м. Такое отклонение имеет место для траектории, измеренной лидаром, т. е. измерение лидаром координат траектории в плоскости движения точнее, чем *ZED*-камерой. Лучшее совпадение измеренных *ZED*-камерой траекторий с программной траекторией объясняется использованием для управления данных с *ZED*-камеры. Частота дискретизации данных с *ZED*-камеры составляла 30 Гц, с лидара – 10 Гц.

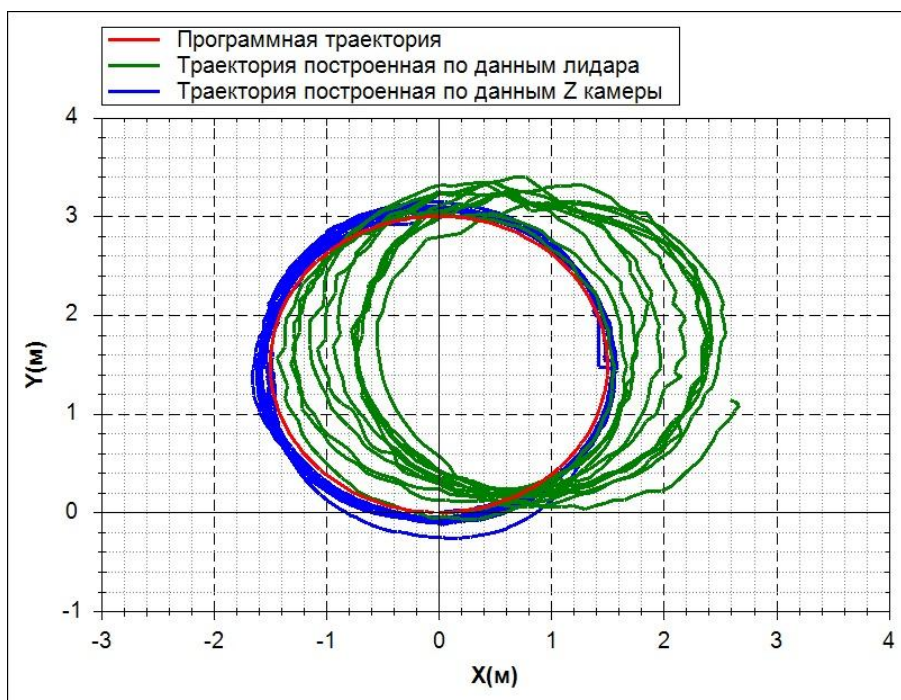


Рис. 2. Траектория движения платформы по кругу диаметром 3 м в помещении

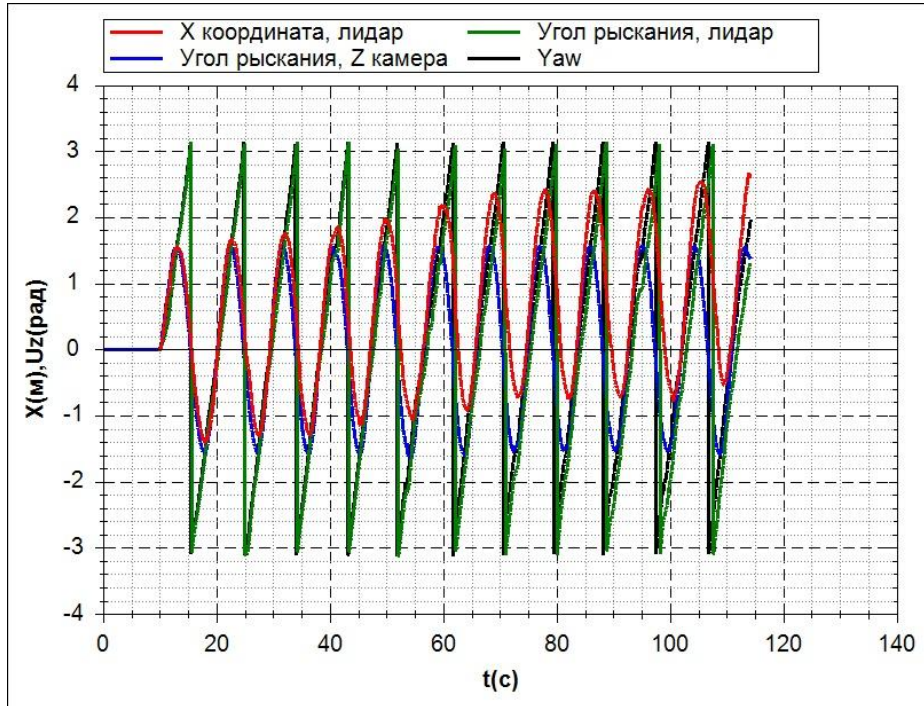


Рис. 3. Углы рыскания при движении платформы по кругу диаметром 3 м в помещении

Угол рыскания платформы для обоих приборов практически одинаков на начальном участке траектории (рис. 3), с течением времени различия нарастают, и после 10 оборотов разница в фазе составляет около 1 с. При этом для обоих приборов угол рыскания достигает значения  $\pi$  в момент максимального значения про-

изводной координаты  $X$  по времени, что соответствует кинематике движения (рис. 4). Если, как было установлено, лидар точнее измеряет координаты платформы, то угол рыскания, измеренный лидаром, также можно считать более точным.

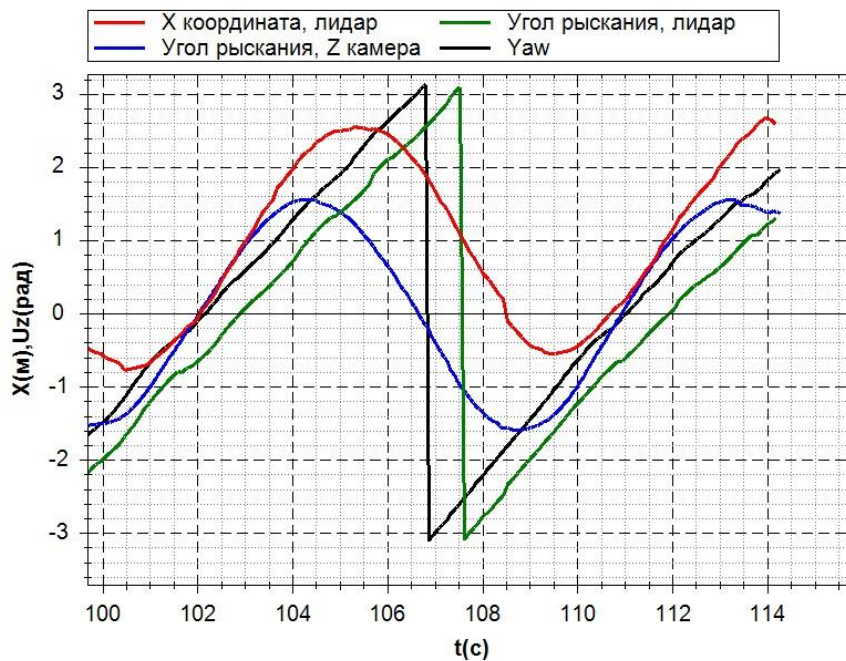


Рис. 4. Углы рыскания при движении платформы по кругу диаметром 3 м в помещении после 9 оборотов

Вертикальная координата платформы измеряется неточно в обоих случаях (рис. 5). Измерения вертикальной координаты с помощью лидара, тем не менее, можно считать более дос-

товерными, поскольку они имеют нулевое математическое ожидание. Размахи вертикальной координаты нарастают во времени и для лидара, и для ZED-камеры.

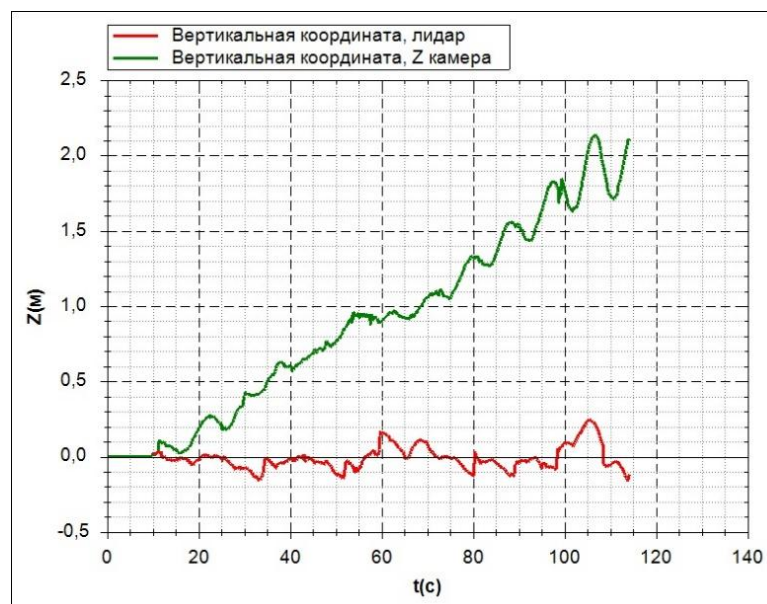


Рис. 5. Вертикальная координата платформы при движении по кругу диаметром 3 м в помещении

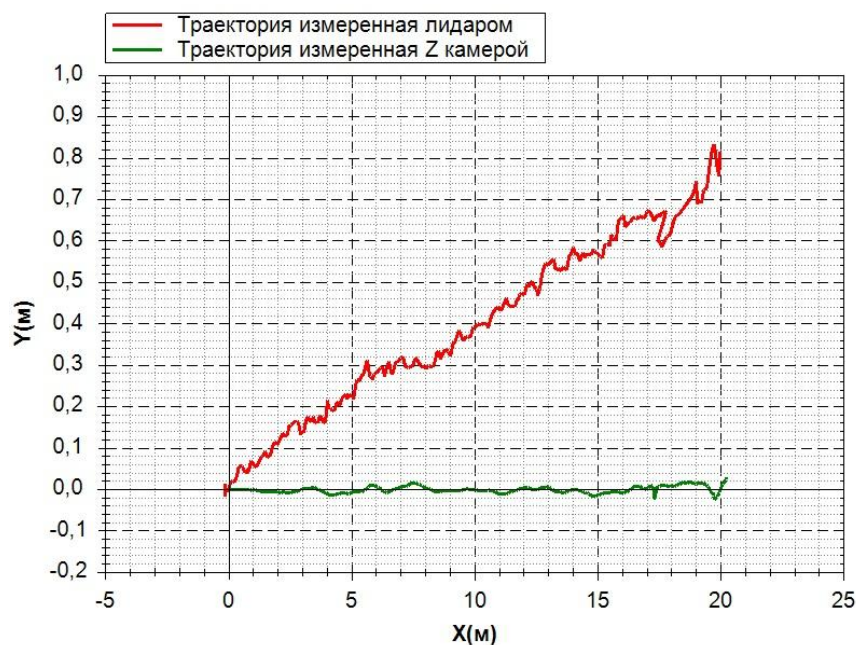


Рис. 6. Траектория движения платформы по прямой длиной 20 м в коридоре шириной 2 м

Движение платформы по прямой линии в узком коридоре также показывает более высо-

кую точность измерения координат лидаром (по точке замыкания) (рис. 6).

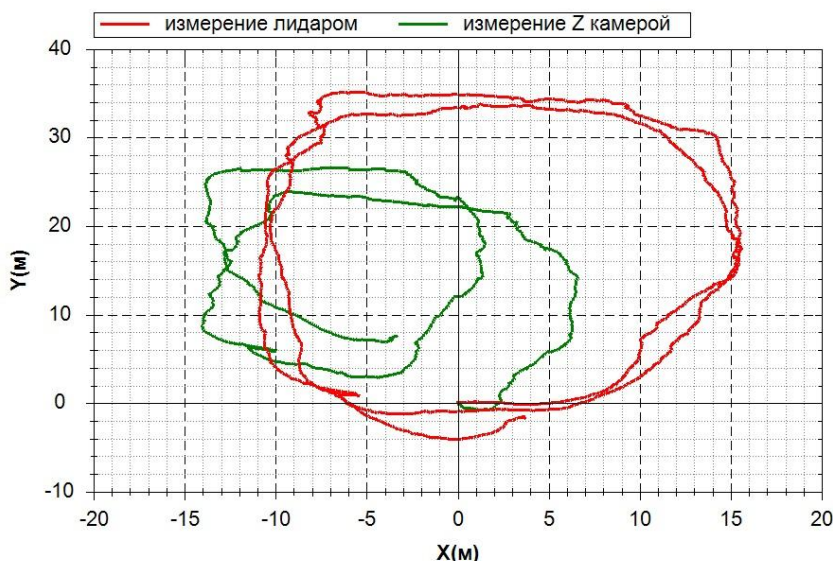


Рис. 7. Траектория движения платформы по кругу радиусом 20 м на открытой территории

Для оценки влияния окружающих условий на определение координат и ориентации платформы были выполнены экспериментальные заезды по кругу большого радиуса – 20 м – на открытой территории (рис. 7). В этом случае

различия между данными лидара и ZED-камеры весьма велики – почти двукратные. По величине отклонения замыкания данные лидара точнее.

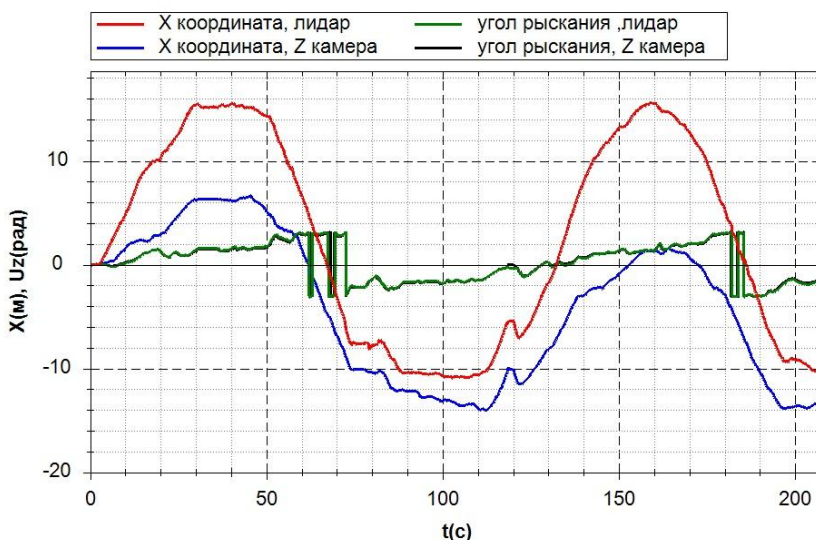


Рис. 8. Углы рыскания при движения платформы по кругу диаметром 40 м на открытой территории

Углы рыскания платформы при движении на открытой территории лидаром также определяются точнее (рис. 8). Для лидара угол рыскания достигает значения  $\pi$  в момент максимальной скорости по соответствующей координате; для ZED-камеры имеет место некоторое смещение.

Углы крена платформы при движении на открытой территории имеет тенденцию к на-

растанию (рис. 9). Можно считать, что данные лидара точнее, поскольку экстремальные значения меньше, чем для ZED-камеры.

Для оценки точности работы алгоритма SLAM в реальных условиях было осуществлено движение платформы по сложной траектории в помещении (рис. 10). В ходе эксперимента платформа управлялась вручную оператором. Было осуществлено движение по следующей

траектории: движение в узком коридоре, заезд в комнату, движение по периметру комнаты, возврат в коридор, разворот, возврат в комнату и так далее.



Рис. 9. Углы крена при движении платформы по кругу диаметром 40 м на открытой территории

По графикам движения, определенным с помощью лидара и ZED-камеры, видно, что SLAM с лидара сохранял правильное определение положения и углов при каждом заезде

в комнату, в то время как SLAM с использованием ZED-камеры накапливал существенную ошибку определения угла поворота по рысканию.

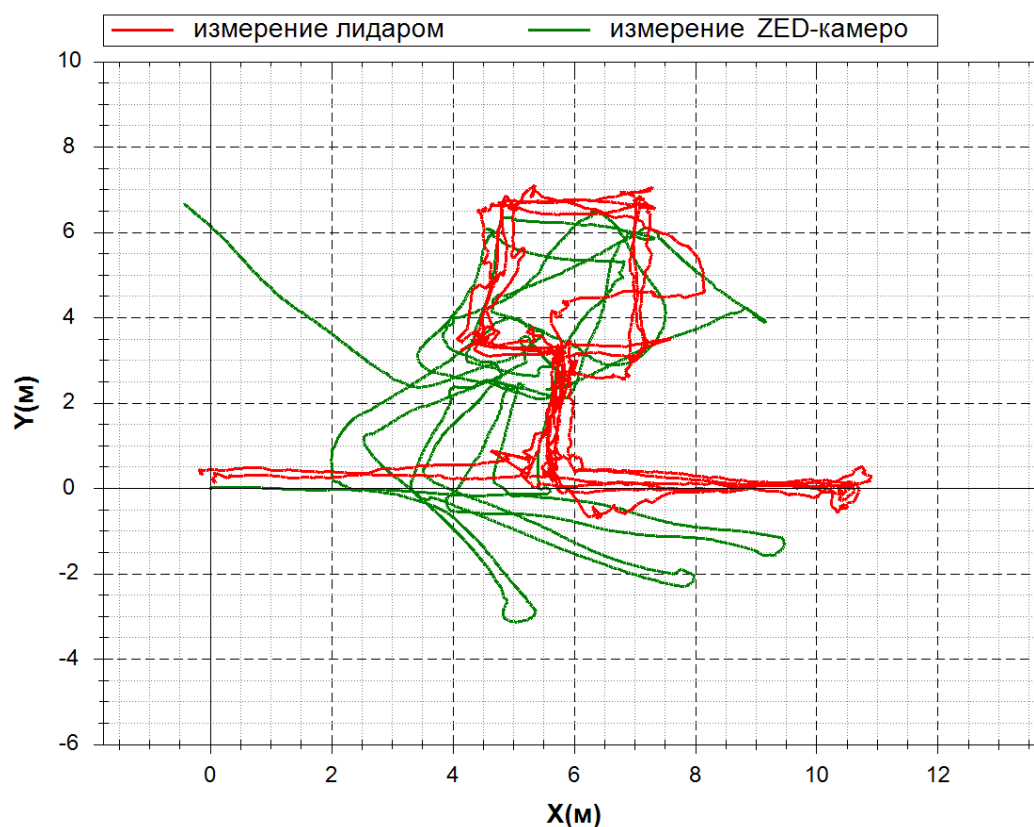


Рис. 10. Движение платформы в помещении по сложной траектории



По результатам работы можно сделать вывод, что параметры траектории, получаемые лидаром, точнее, чем от ZED-камеры. Основной проблемой алгоритма SLAM от ZED являются значительные ошибки в определении угла поворота по рысканию, в результате чего, после нескольких поворотов, происходит существенное отклонение определяемой траектории от реальной. Управление от ZED-камеры имеет то преимущество, что данные с нее поступают с большей частотой.

#### Заключение

В результате проведенного экспериментального анализа можно предложить методы улучшения получаемых данных. Целесообразно корректировать данные ZED-камеры по координатам с учетом данных лидара. Это может быть реализовано, например, с помощью дифференциального звена первого порядка, на вход которого подается разница в данных между лидаром и ZED-камерой. Коррекция данных ZED-камеры может быть осуществлена с использованием данных по углу рыскания, в частности, преобразованием пути платформы вдоль траектории движения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программно-аппаратный комплекс для создания и исследования систем управления локомоцией и автономным движением мобильных роботов / А. С. Горобцов, А. Е. Марков, П. С. Тарасов, А. В. Скориков, А. В. Дианский, Д. А. Степаненко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (256) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 21–25.
2. Zhang, J. LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time / Ji Zhang, Sanjiv Singh // Robotics: Science and Systems Conference, July 12–16, 2014. – 2014.
3. Mur-Artal, R. ORB-SLAM2: an Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras / Raul Mur-Artal, Juan D. Tard // CoRR. – 2016. – Vol. 33, issue. 5. – P. 1255–1262.
4. Engel, J. LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM / J. Engel, S. Schöps, D. Cremers // Lecture Notes in Computer Science, 2014. – Vol. 8690.
5. Labbe, M. Online Global Loop Closure Detection for Large-Scale Multi-Session Graph-Based SLAM / M. Labbe, F. Michaud // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014. – P. 2661–2666.
6. Visual Odometry / SLAM Evaluation 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval\\_odometry.php](http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval_odometry.php) (дата обращения 14.10.2018).
7. Geiger, A. Are we ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite / A. Geiger, P. Lenz, R. Urtasun // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013.
8. Autonomous Car Driving Platform | NVidia Drive APX [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.nvidia.com/en-us/self-driving-cars/drive-platform/> (дата обращения: 14.10.2018).
9. Meet the ZED StereoCamera [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.stereolabs.com/zed/> (дата обращения: 14.10.2018).
10. Dagu Wild Thumper 6WDAll-Terrain Chassis [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.pololu.com/product/1561> (дата обращения: 14.10.2018).
11. Решения NVidia Jetson для разработки встраиваемых систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems-dev-kits-modules/> (дата обращения 14.10.2018).
12. Dual VNH3SP30 Motor Driver Carrier MD03A [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.pololu.com/product/707> (дата обращения: 14.10.2018).
13. Larson, R. Precalculus / R. Larson. – Brooks/Cole/Cengage Learning, 2007. – 452 p.
14. Jetson\_car [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://github.com/Garrus007/jetson\\_car](https://github.com/Garrus007/jetson_car) (дата обращения: 30.06.2022).
- 15.. Системы машинного зрения мобильных роботов / В. А. Беликов, В. В. Жога, В. Н. Скакунов, С. Е. Терехов, И. В. Шаманов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 25 (152) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 184–190.
16. A Driver Modeling Based on the Preview-Follower Theory and the Jerky Dynamic / Jianyong Cao [et al.] // Mathematical Problems in Engineering. – 2013. – P. 1–10.
17. LeGO-LOAM: Lightweight and Ground-Optimized Lidar Odometry and Mapping on Variable Terrain / Shan [et al.] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018. – P. 4758–4765.

УДК 531.8

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-56-62

*Е. А. Марчук<sup>1</sup>, Я. В. Калинин<sup>1</sup>, М. А. Иванов<sup>1</sup>, А. В. Малолетов<sup>1,2</sup>***О ВЫБОРЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВИСЯЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КРУПНОГАБАРИТНОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО  
ТРОСОВОГО РОБОТА\***<sup>1</sup> Университет Иннополис<sup>2</sup> Волгоградский государственный технический университет

e.marchuk@innopolis.ru

В статье описывается обоснование выбора математических моделей для висячих элементов крупногабаритных тросовых роботов. Выбор моделей основывается на механических свойствах элементов в конкретных условиях эксплуатации. Также учитывается концепция системы автоматического управления роботом. С учетом перечисленных факторов, для каждого типа висячих элементов, используемых в конструкции робота, выбирается типовая модель: цепная линия или стержень. С использованием выбранных моделей производится численное моделирование.

*Ключевые слова:* цепная линия, стержень, функция активации, тросовый робот.

*E. A. Marchuk<sup>1</sup>, Ya. V. Kalinin<sup>1</sup>, M. A. Ivanou<sup>1</sup>, A. V. Maloletov<sup>1,2</sup>***ON MATHEMATICAL MODELING OF SAGGING ELEMENTS  
OF LARGE-SIZED PARALLEL CABLE-DRIVEN ROBOT**<sup>1</sup> Innopolis University<sup>2</sup> Volgograd State Technical University

The article deals with a problem of modeling of sagging elements of large-sized cable-driven parallel robot. Mechanical properties of the elements in specific cases and the concept of control system are taken into account. With regard to the listed reasons, typical mechanical models have to be chosen: the catenary, or the beam, or the rod. The results of the research have been shown with numerical simulation.

*Keywords:* catenary, rod, activation function, cable-driven robot.

**Введение**

Параллельные тросовые роботы являются относительно новым направлением в промышленной робототехнике. Первые образцы параллельных тросовых роботов, пригодные к практическому использованию, появились в конце 80-х гг. XX века и представляли собой платформы Стюарта, стабилизирующие подъемные краны морских платформ [1, 2]. В течение 90-х гг. XX века происходило интенсивное развитие направления тросовых роботов; большинство научных статей, впервые освещавших основные проблемы тросовых роботов, относится к этому периоду [3, 4]. Начиная с первого десятилетия XXI века, тросовые роботы широко используются в специфических областях применения – там, где необходимо перемещение объектов в рабочем пространстве большого объема [5, 6]. Так, до начала массового использования квадрокоптеров, при видеосъемке стадионов использовались камеры, перемещающиеся на тросовых системах. Другой областью примене-

ния тросовых роботов является складская деятельность, а именно перемещение грузов на больших площадях. В настоящее время наиболее перспективной областью использования тросовых роботов видится монолитное строительство методом 3D-печати с использованием экструдера в качестве рабочего инструмента тросового робота [7].

С другой стороны, тросовые механизмы, такие как лебедки и подъемные краны, были хорошо известны еще в античном мире [8]. Тросовая система параллельного тросового робота, по сути, представляет собой несколько синхронизированных подъемных механизмов. Таким образом, традиционные корейские и китайские подъемные краны, сохранившиеся до наших дней и упоминающиеся в письменных источниках начиная с XVII в., отличаются от современных тросовых роботов лишь тем, что приводились они в движение мускульной силой людей, и синхронизация движителей осуществлялась под управлением человека [9].

Тросовые системы обладают специфическими свойствами: тросы способны к провисанию, а с точки зрения механики тросы являются односторонними связями. При проектировании тросовых систем следует учитывать геометрическую и структурную нелинейность тросов. Как правило, в математическом описании тросов при инженерном проектировании объектов используется теория тяжелой гибкой нити. Однако, при условии сильного натяжения и малой массы тросов, в математической модели тросовых роботов может приниматься допущение об исключении геометрической нелинейности тросов, и, таким образом, тросы считаются растяжимыми стержнями [10]. Помимо тросов в конструкцию тросового робота могут входить, например, подающие шланги. Шланги, как правило, сильно провисают, и поэтому могут быть смоделированы как тяжелые гибкие нити [11]. Конечно-элементные модели шлангов и тросов, а также сложные полумпирические модели витых стальных канатов в контексте настоящей работы не рассматриваются [12, 13].

Далее производится обоснование выбора математических моделей для тросов и подающего шланга на примере строительного комплекса на базе крупногабаритного параллельного тросового робота (рис. 1).

#### Моделирование тросов параллельного тросового робота

Наиболее часто в научной литературе приводятся рекомендации по проектированию параллельных тросовых роботов исходя из предположения о том, что тросы натянуты сильно и не провисают [5, 6]. Данное предположение исключает геометрическую нелинейность тросов из математической модели. Обозначенный подход удобен при построении математической модели робота, поскольку делает возможным использование общеизвестных методов линейной алгебры. В векторном представлении кинематика тросовой системы приобретает вид:

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{R}\mathbf{b}_i - \mathbf{r}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{l}_i$  – вектор, соединяющий точку схода  $i$ -го троса с направляющего ролика с точкой крепления троса к рабочему инструменту робота;  $\mathbf{a}_i$  – вектор, соединяющий начало неподвижной системы координат с точкой схода  $i$ -го троса с направляющего ролика;  $\mathbf{R}$  – матрица поворота;  $\mathbf{b}_i$  – вектор, соединяющий начало под-

вижной системы координат с точкой крепления троса к рабочему инструменту робота;  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор, соединяющий начало неподвижной системы координат с началом подвижной системы координат.

Матрица Якоби используется для перевода скоростей из пространства приводов в пространство рабочего инструмента робота. Для параллельного восьмитросового робота матрица приобретает вид:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{l}_1}{\|\mathbf{l}_1\|_2} & \dots & \frac{\mathbf{l}_8}{\|\mathbf{l}_8\|_2} \\ \mathbf{b}_1 \times \frac{\mathbf{l}_1}{\|\mathbf{l}_1\|_2} & \dots & \mathbf{b}_8 \times \frac{\mathbf{l}_8}{\|\mathbf{l}_8\|_2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Также матрица (2) удобна для перевода сил и моментов между обозначенными выше пространствами. Динамика параллельного тросового робота в таком случае описывается матричной формой уравнения движения твердого тела:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}_c = -\mathbf{w}_p + \mathbf{J}\mathbf{f}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{q}$  – вектор обобщенных координат;  $\mathbf{M}$  – матрица масс;  $\mathbf{D}$  – матрица затухания;  $\mathbf{g}_c$  – фактор воздействия центробежной и кориолисовой сил;  $\mathbf{w}_p$  – динамический винт внешних сил;  $\mathbf{J}$  – матрица Якоби;  $\mathbf{f}$  – вектор сил натяжений в тросах.

С учетом конструктивной нелинейности тросов, сила натяжения каждого  $i$ -го троса выражается с использованием функции активации:

$$f = f^* \cdot \frac{1}{1 + e^{-b(\Delta l - a)}}, \quad (4)$$

где сила  $f^*$  находится в соответствии с моделью Фойгта:

$$f^* = ES \frac{\Delta l}{l_0} + \eta S \frac{\Delta \dot{l}}{l_0}; \quad (5)$$

здесь  $E$  – модуль Юнга материала троса;  $S$  – площадь поперечного сечения троса;  $\eta$  – динамическая вязкость материала троса;  $l_0$  – длина троса в недеформированном состоянии;  $\Delta l$  – величина деформации троса.

Уравнение (3) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение и легко решается с использованием численных методов (например, Рунге – Кутты).

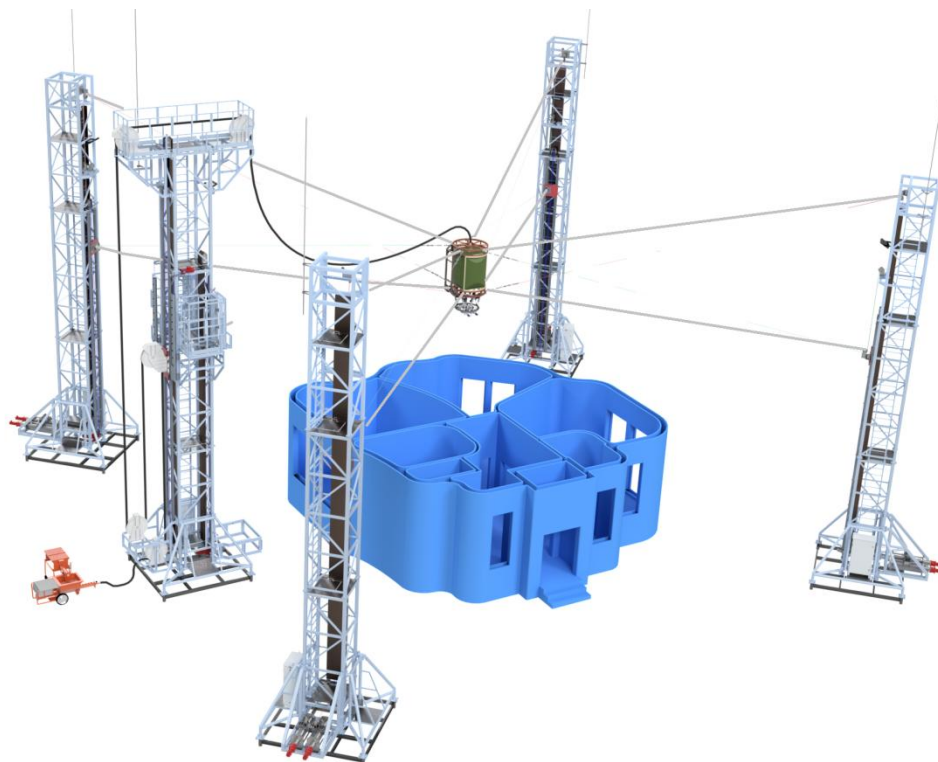


Рис. 1. Модель разрабатываемого строительного роботизированного комплекса  
Университета Иннополис

Следует отметить, что несмотря на простоту и удобство использования векторного представления, данное допущение неадекватно свойствам реальных тросов. При использовании тросов из высокомолекулярного полипропилена Даунтема удельный вес тросов весьма мал, однако, даже в таком случае, при сильном натяжении форма троса соответствует цепной линии с малой стрелой провисания, но не является прямой линией. Впрочем, на практике метод показывает хорошие результаты по точности соответствия фактических значений расчетным для полноприводных параллельных тросовых роботов, а также параллельных тросовых роботов с избыточным числом степеней свободы. Отклонения в позиционировании и ориентации рабочего инструмента, обусловленные неточностями математической модели, компенсируются системой автоматического управления с обратной связью [14].

Для обеспечения эффективного автоматического управления без обратной связи математическая модель тросовой системы должна быть составлена таким образом, чтобы как можно точнее передавать деформации реальных тросов. В данном случае составляется система уравнений статического равновесия тросовой системы с представлением провисающих

тросов как тяжелых гибких нитей. Математическое моделирование цепной линии тяжелой гибкой нити рассматривается подробно в следующем разделе настоящего исследования. Полученная система решается численными методами с интегрированием в граничных условиях. Метод более адекватен свойствам реальных тросов, однако обладает большой вычислительной сложностью в силу необходимости решения системы трансцендентных уравнений для нахождения параметров цепной линии каждого троса и последующего численного интегрирования системы дифференциальных уравнений с граничными условиями на каждом шаге перемещения рабочего инструмента робота. Метод актуален в случаях, когда сила натяжения тросов невелика (например, при небольшой массе полезной нагрузки), а также для неполноприводных параллельных тросовых роботов. Описание метода приводится, например, в работе [15].

В рассматриваемой в настоящей статье модели строительного комплекса на базе крупногабаритного параллельного тросового робота предполагается использование математической модели с непровисающими тросами и автоматической системы управления с обратной связью.

**Моделирование подающего шланга**

В процессе проектирования аппаратов крупномасштабной послойной печати в качестве основы принтера могут использоваться различные типы промышленных роботов: манипуляторы, портального типа, тросовые роботы и др. Также могут использоваться различные способы подачи печатного материала к блоку экструзии: сухие строительные смеси, мокрые строительные смеси и другие материалы. Предполагается, что печатная головка перемещается плавно и относительно медленно. В случае подачи строительных смесей, особенно мокрых, удельная масса шланга становится значительной и элементы конструкции принтера требуют дополнительных расчетов на прочность. Предполагается, что форма провисающего шланга соответствует форме цепной линии, а однородная смесь подается равномерно и без пульсаций. Ставится задача определения реакций в точках крепления шланга к экструдеру и к несущей конструкции при квазистатическом нагружении элементов крупногабаритного принтера. Задача является особенно актуальной для тросовых роботов по причине чувствительности тросовой системы к внешним воздействиям.

Задачи моделирования шлангов технологического оборудования приводятся в [11]. В настоящей работе рассматривается плоская задача цепной линии с ограничением на параметры стрелы провисания. Теория тяжелой гибкой нити, представленной как цепная линия, приводится в [16]. В декартовой системе координат цепная линия точно описывается уравнением

$$y = a \cosh \frac{x}{a}, \tag{6}$$

где  $x$  – расстояние от вершины функции, расположенной в начале системы координат, связанной с цепной линией, до горизонтальной проекции точки, принадлежащей цепной линии;  $a$  – особый параметр цепной линии.

Ограничение на конфигурацию цепной линии задается следующим образом: при натяжении шланга так, что оба его конца находятся на одной ветви гиперболического косинуса, в большинстве практических случаев сила натяжения шланга будет большой; при натяжении шланга так, что его концы находятся на разных ветвях гиперболического косинуса, в большинстве практических случаев сила натяжения шланга будет меньше; обе конфигурации приводятся на рис. 2. Для рассматриваемого случая выбирается второй вариант конфигурации.

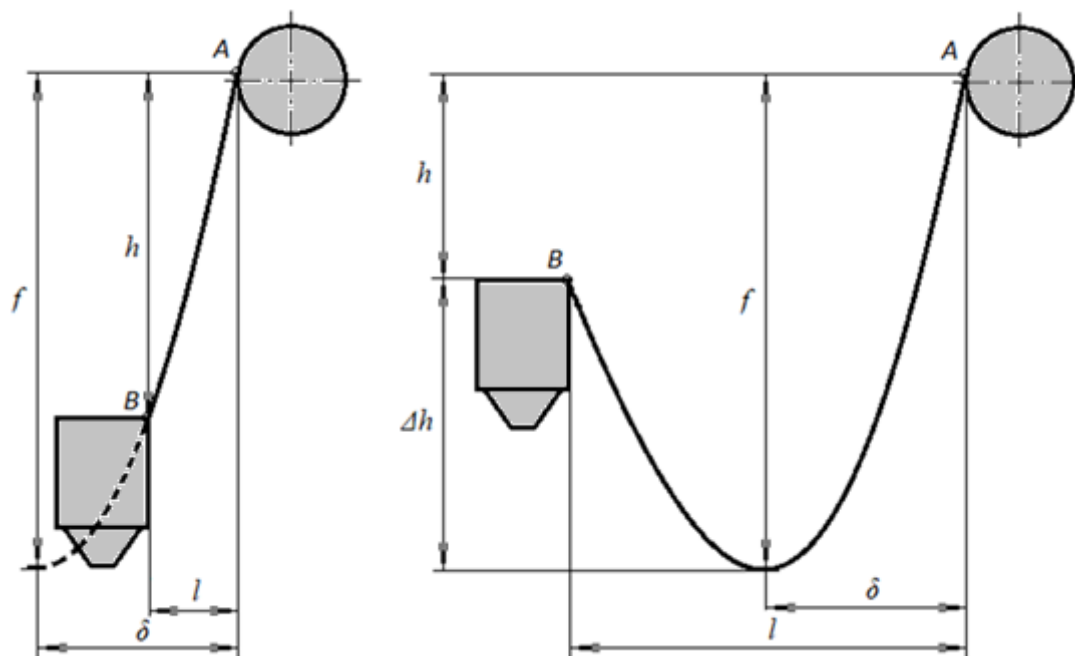


Рис. 2. Конфигурации цепной линии подающего шланга экструдера

Дополнительное ограничение на стрелу провисания для аппарата крупномасштабной послойной печати задается исходя из условия: низ-

шая точка шланга не может находиться ниже сопла экструдера, поскольку в противном случае шланг будет сталкиваться с объектом печати.

Здесь может быть поставлена задача оптимизации в различных формулировках: минимизация горизонтальной или вертикальной составляющей силы натяжения, либо по иным критериям. Сила натяжения в любой точке цепной линии находится как

$$T = qa \cosh \frac{x}{a}, \quad (7)$$

где  $q$  – удельный вес элемента цепной линии.

Следует заметить, что горизонтальная составляющая силы натяжения в любой точке цепной линии постоянна и равна

$$T_H = qa \quad (8)$$

Таким образом, с учетом (7) и (8), силы натяжения на концах шланга могут быть определены и разложены на вертикальную и горизонтальную составляющую при известном значении параметра  $a$ .

Для нахождения параметра  $a$  необходимо решить систему из двух трансцендентных уравнений [17]:

$$\begin{cases} \frac{\delta}{a} = \frac{1}{f-h} \left( \cosh \frac{l-\delta}{a} - 1 \right) - \frac{l-\delta}{a} \\ \frac{l-\delta}{a} = \frac{1}{f} \left( \cosh \frac{\delta}{a} - 1 \right) - \frac{\delta}{a} \end{cases}, \quad (9)$$

где  $\delta$  – расстояние между горизонтальными проекциями вершины цепной линии и одной из

точек закрепления;  $l$  – расстояние между горизонтальными проекциями точек закрепления;  $h$  – разность высот точек закрепления концов нити;  $f$  – стрела провисания.

С учетом обозначенных выше ограничений, система (9) может быть представлена как

$$\begin{cases} \cosh^{-1} \left( \frac{f-h}{a} + 1 \right) - \frac{l-\delta}{a} = 0 \\ \cosh^{-1} \left( \frac{f}{a} + 1 \right) - \frac{\delta}{a} = 0 \end{cases}. \quad (10)$$

В таком виде (10) исключаются решения для случаев  $l < \delta$ , противоречащих заданному ограничению на конфигурацию шланга, а также  $f < h$ , противоречащих физическому смыслу. Полученная система (10) решается численными методами относительно  $\delta$  и  $a$ .

#### Численное моделирование

Численный эксперимент проводится следующим образом:

- 1) задаются параметры основной системы тросового робота;
- 2) задаются ограничения на конфигурацию шланга (параметры цепной линии);
- 3) задаются координаты концов шланга (подвижного и неподвижного) в начальный момент времени;

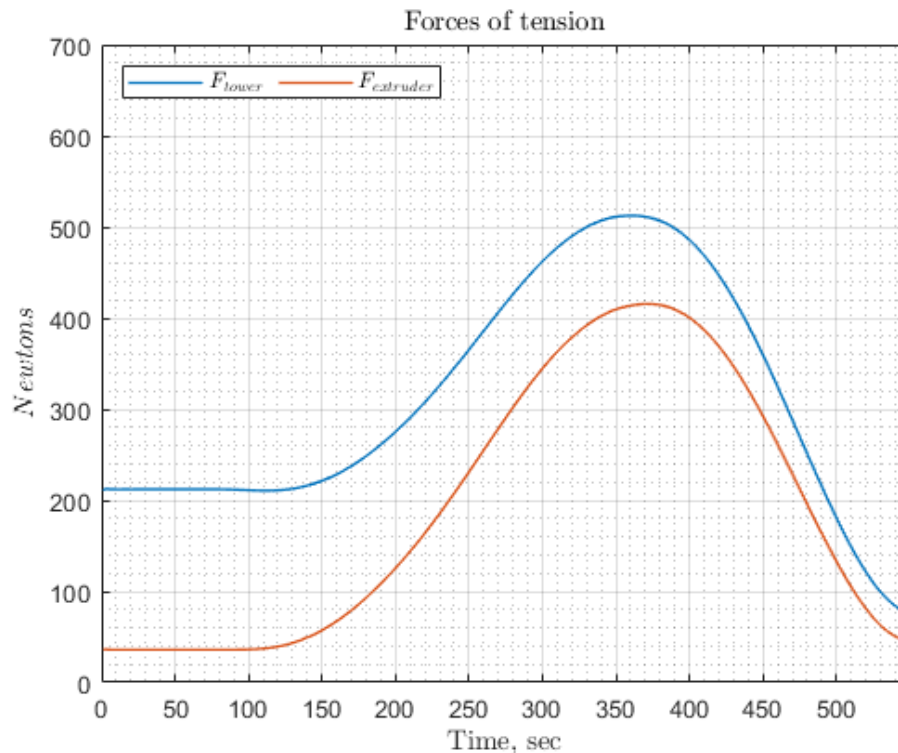


Рис. 3. Силы на концах шланга при размещении концов шланга на разных ветвях цепной линии (ограничения на конфигурацию и на стрелу провисания  $f = h + 0.8$  м)

4) задается закон движения для материальной точки (точка крепления подвижного конца шланга к экструдеру);

5) определяются реакции в точках крепления шланга с учетом заданных ограничений;

6) определяются силы натяжения тросов;

7) по результатам численного эксперимента делаются выводы с учетом заданной конфигурации тросовой системы.

Результаты проведенного численного экс-

перимента представлены на рис. 3, 4. Расчеты произведены для рабочей площадки размерами 20×20 м; верхний конец шланга расположен на высоте 15 м над серединой одной из сторон площадки; нижний конец шланга совпадает с материальной точкой, движущейся по цилиндрической винтовой траектории радиусом 8 м с осью в середине площадки и поднимающейся с высоты 1 м на высоту 8 м за один полный оборот; удельный вес шланга 25 Н/м.

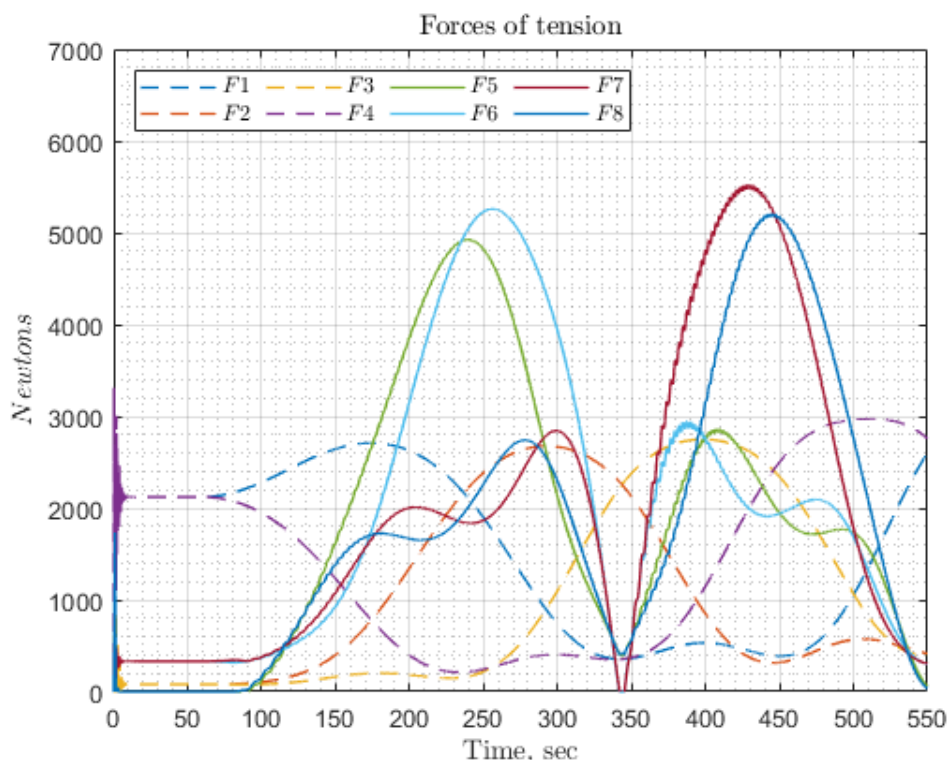


Рис. 4. Силы в точках схода тросов с направляющих роликов, расположенных на несущих башнях с учетом воздействия подающего шланга

### Выводы

В настоящем исследовании рассмотрены случаи для двух типов математических моделей висячих элементов тросового роботизированного комплекса. В моделировании крупногабаритного параллельного тросового робота с линейными размерами рабочего пространства в десятки метров становятся значительными эффекты от деформации конструкционных материалов. В настоящей работе в численную модель робота включено условие деформируемых башен через модель Эйлера – Бернулли, однако внимание на деформации несущих башен не акцентируется, поскольку вопрос деформаций элементов конструкции робота подробно рассматривается авторами в работе [18]. В данном исследовании также не затрагивается вопрос

компенсации отклонений, рассмотренный авторами в работе [14]. Результатом настоящей работы является численное моделирование параллельного тросового робота с подающим шлангом, позволяющее оценить нагрузки на элементы конструкции робота, созданные натяжением его висячих элементов. Оцениваются динамические нагрузки на несущие башни в точках схода тросов, также производится оценка квазистатической нагрузки на точку крепления шланга к экструдеру и на точку схода шланга с дополнительной башней.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Landsberger, S. E. Design and construction of a cable-controlled, parallel link manipulator. – Massachusetts Institute of Technology, 1984.

2. *Albus, J. S.* Cable arrangement and lifting platform for stabilized load lifting US Patent No. 4 883 184, Nov. 28, 1989.
3. Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system / S. Kawamura, W. Choe, S. Tanaka, S. R. Pandian // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 1:215–220, 1995.
4. *Maeda, K.* On design of a redundant wire-driven parallel robot WARP manipulator / K. Maeda, S. Tadokoro, T. Takamori, M. Hiller, R. Verhoeven // Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 1:895–900, 1999.
5. *Zi, B.* Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications / B. Zi, S. Qian. – Springer, 2017.
6. *Pott, A.* Cable-Driven Parallel Robots : Theory and Application. – Springer, 2018.
7. *Marchuk E., Kalinin Ya., Maloletov A.* On Smooth Planar Curvilinear Motion of End-Effector of Cable-Driven Parallel Robot / E. Marchuk, Ya. Kalinin, A. Maloletov // IFAC – PapersOnLine, 2022.
8. *McNeil, I.* An Encyclopaedia of the history of technology. – Routledge, 1996.
9. *Kim, P. W.* Scientific Disciplines of Geojunggi (the Traditional Crane) in Korean Science, Technology and History Class // EURASIA Journal of Mathematics Science and Technology Education. – 2017. – № 13(9). – P. 6147–6163.
10. *Kalinin, Ya. V.* Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot / Ya. V. Kalinin, E. A. Marchuk // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2021. – Vol. 22, no 10. – P. 547.
11. *Светлицкий, В. А.* Механика трубопроводов и шлангов / В. А. Светлицкий. – М. : Машиностроение, 1982. – 280 с.
12. Finite Element Modelling on the Mechanical Behaviour of Marine Bonded Composite Hose (MBCH) under Burst and Collapse / C. V. Amaechi, C. Chesterton, H. O. Butler, Z. Gu, A. C. Odijie, F. Wang, X. Hou, J. Ye // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – №10.
13. *Малиновский, В. А.* Стальные канаты / В. А. Малиновский. – Одесса : Астропринт, 2001. – 188 с.
14. *Marchuk, E. A.* Error Compensation in Position and Orientation of Mobile Platform of Cable-Driven Robots via Tensile Forces Measurement / E. A. Marchuk, Ya.V. Kalinin, A. V. Maloletov // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2022.
15. Deep Learning with Transfer Learning Method for Error Compensation of Cable-driven Robot / A. Akhmetzyanov, M. Rassabin, A. Maloletov, M. Fadeev, A. Klimchik // In Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2020), 2020. – P. 553.
16. *Янпольский, А. Р.* Гиперболические функции / А. Р. Янпольский. – Физматгиз, 1960. – 196 с.
17. *Меркин, Д. Р.* Введение в механику гибкой нити. – М. : Наука, 1980. – 240 с.
18. On Problem of Position and Orientation Errors of Large-Sized Cable-Driven Parallel Robot / E. Marchuk, Ya. Kalinin, I. Vysotskaya, A. Maloletov // 2022 International Conference “Nonlinearity, Information and Robotics” (NIR), 2022.

УДК 62-51

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-62-66

*М. А. Останин, А. С. Климчик*

## АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕК-РОБОТ НА ОСНОВЕ СМЕШАННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Университет Иннополис

m.ostanin@innopolis.ru, a.klimchik@innopolis.ru,

В статье исследована модель взаимодействия человека и робота на основе смешанной реальности. Рассмотрено взаимодействие человека и робота в процессах программирования и супервизорного управления. Предложена архитектура системы взаимодействия человек-робот на основе смешанной реальности, описаны функциональные блоки системы и алгоритм работы.

*Ключевые слова:* взаимодействие человек-робот, смешанная реальность, программирование роботов.

*M. A. Ostanin, A. S. Klimchik*

## HUMAN-ROBOT INTERACTION SYSTEM ARCHITECTURE BASED ON MIXED REALITY

Innopolis University

Paper investigates the model of human-robot interaction based on mixed reality. Human-robot interaction in the processes of programming and supervision control is considered. The architectural model of a human-robot interaction system based on mixed reality is proposed with the description of functional blocks of the system and the operation algorithm.

*Keywords:* human-robot interaction, mixed reality, robot programming.

### Введение

В настоящее время существует множество интерфейсов для взаимодействия с роботами в

процессах программирования и супервизорного управления, однако понятная и естественная связь между людьми и роботами по-прежнему



остаётся серьезной проблемой [1]. Помимо улучшения классических интерфейсов ведутся исследования по разработке новых типов интерфейсов (в частности, на основе дополненной и виртуальной реальности [2–4]), которые в ряде аспектов превосходят классические интерфейсы. Вместе с тем, в отличие от них, идет развитие интерфейсов смешанной реальности, как технологически нового вида цифровой реальности [5], в котором физические и виртуальные объекты воспринимаются органами чувств человека как объекты единого пространства [6–8]. Смешанная реальность реализует гибкое сплетение цифрового и реального мира и позволяет элементам в одном мире реагировать непосредственно на то, что происходит в другом.

**Взаимодействие человек-робот**

Одной из актуальных проблем является то, что взаимодействие с большинством современных роботов строится таким образом, что сперва оператор устанавливает задачу роботу через интерфейс человек-компьютер, а затем взаимодействует с ним через физический интерфейс. Такая модель взаимодействия при постановке задач не учитывает физическую природу роботов, оператор при постановке задачи должен учитывать габариты робота и физическую траекторию движения в пространстве выполнения задачи. Интерфейс постановки задачи может быть реализован на пульте робота или на выделенном дисплее персонального компьютера, но через 2Д-дисплей нельзя достичь пространственного восприятия человеком поставленной задачи. Это приводит к ошибкам при постановке задачи и проблемам с безопасностью при исполнении задачи, так как у человека нет наглядной информации о том, как и куда поедет робот.

Для решения этой проблемы применяют интерфейсы дополненной реальности, которые позволяют через 2Д-экран произвести наложение цифровой модели робота на изображение реального мира. Визуализация траектории и воспроизведение симуляции в дополненной реальности требует просмотра с разных ракурсов для получения пространственного восприятия человеком. Помимо этого, через интерфейс дополненной реальности нельзя реализовать физическое взаимодействие между роботом и человеком.

Более эффективным является использование смешанной реальности для организации взаимодействия между человеком и роботом. Смешанная реальность основана на том, что

реальные и виртуальные объекты существуют в едином 3Д-пространстве и одинаковы для восприятия человека, и он может взаимодействовать с этими объектами. Важно отметить, что для погружения в смешанную реальность используются стереочки, которые позволяют визуализировать 3Д-виртуальные объекты с пространственным ощущением для человека.

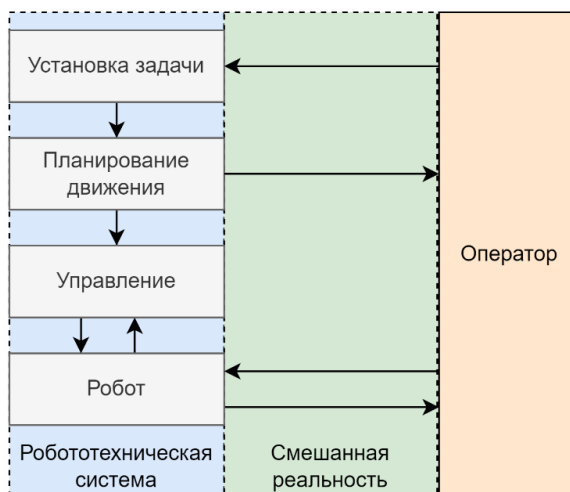


Рис. 1. Модель взаимодействия человек-робот через интерфейс смешанной реальности

Модель взаимодействия на основе интерфейса смешанной реальности показана на рис. 1. Смешанная реальность позволяет оператору устанавливать задачу роботу в виде 3Д-голограмм в физическом пространстве робота, тем самым человек имеет явное представление о результате задачи, поставленной роботу. При этом смешанная реальность позволяет визуализировать траекторию движения робота в пространственном виде; в таком случае оператору не нужно иметь специальные знания для прогнозирования движения робота, это все ему наглядно видно. Данная модель взаимодействия поможет уменьшить количество ошибок при постановке задачи и повысить безопасность при ее выполнении. Возможности новой модели взаимодействия объясняются тем, что любое действие робота имеет конечный физический результат, соответственно, это физическое представление результата можно отобразить в виде виртуальной 3Д-модели.

**Постановка задачи**

Решается задача разработки системы взаимодействия человек-робот в рамках процессов программирования промышленных роботов и супервизорного управления сервисными робота-

ми на основе смешанной реальности. Другие сценарии взаимодействия человека и робота не учитываются. Особенностью решаемой задачи является применение очков смешанной реальности в качестве основного устройства.

#### Программная архитектура системы взаимодействия человек-робот на основе смешанной реальности

Для решения задачи предложена архитектура модели системы, которая описана в виде блок-схемы на рис. 2. Она делится на три основные части: устройство смешанной реальности, система трансформаций и роботы. Блоки

управления промышленными или сервисными роботами являются абстрактными и могут иметь различную внутреннюю архитектуру и реализацию. Модуль устройства смешанной реальности содержит основные программно-аппаратные блоки для реализации системы.

Интерфейс – пространственный графический интерфейс, отвечающий за формирование команд и структурирование процесса взаимодействия. Блок принимает на вход данные о действиях человека. На выходе команды отправляются на блоки виртуальных роботов и планирования задач.

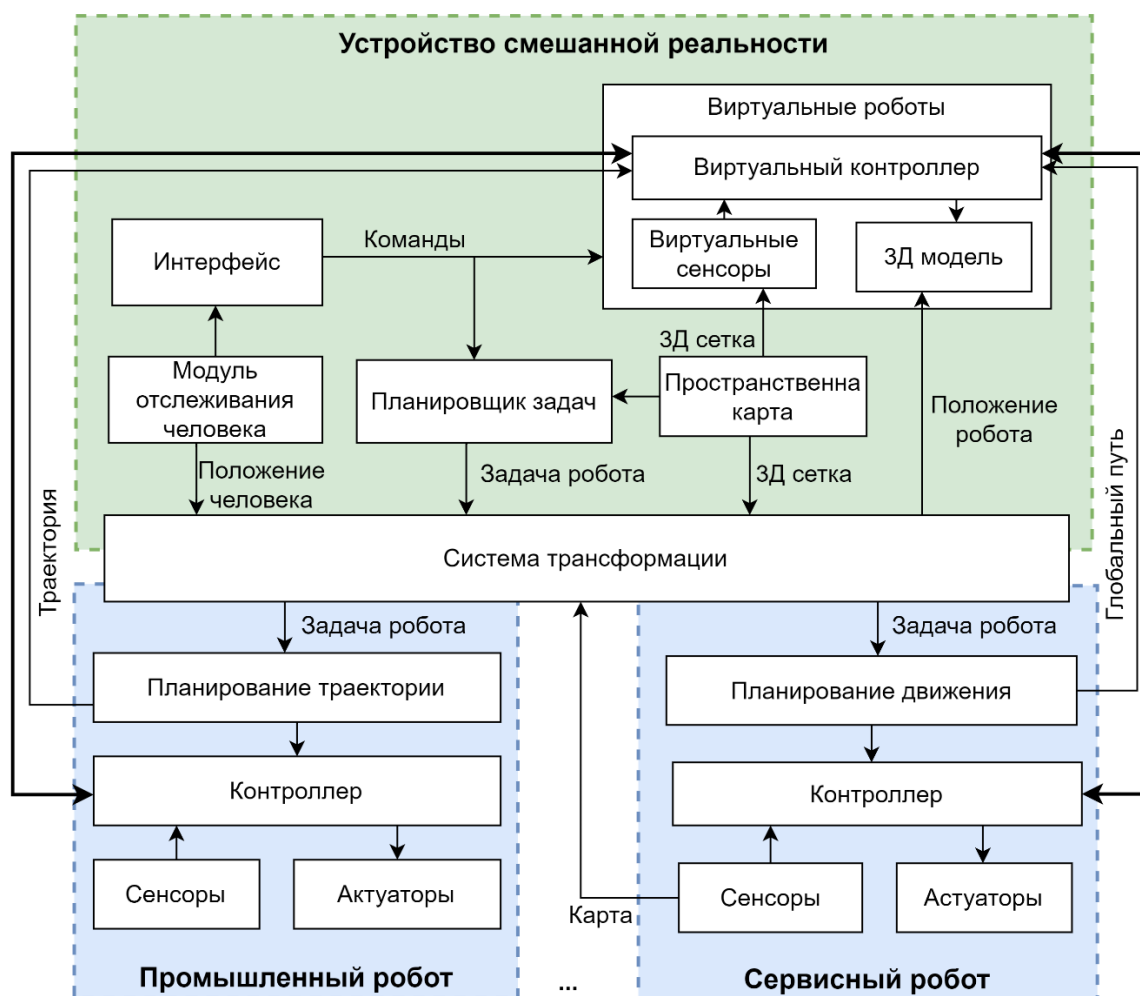


Рис. 2. Архитектурная модель системы взаимодействия человек-робот на основе смешанной реальности

Виртуальные роботы – цифровые двойники реальных роботов, с которыми происходит взаимодействие человека, повторяющие кинематическую структуру физических роботов. Они отвечают за визуализацию состояния робота, симуляцию движения в смешанной реальности и взаимодействуют с пространственной картой. Виртуальные роботы имеют собст-

венные местоположения в среде смешанной реальности. На вход виртуальные роботы принимают положение их в пространстве смешанной реальности, это необходимо для установки голограммы робота на место реального робота. Виртуальные роботы принимают на вход спланированную траекторию движения и глобальный путь, для симуляции движения и визуализации

зации ее пользователю. Это необходимо для верификации пользователем заданной программы через цифровой двойник робота. Помимо этого, виртуальный робот принимает информацию с сенсоров робота или другую информацию о его состоянии и визуализирует оператору через устройство смешанной реальности. Виртуальные роботы передают свое положение и ориентацию на блок планирования задачи.

Пространственная карта – это виртуальное геометрическое представление окружающего пользователя мира. Это модуль, переносящий реальное окружение в цифровую среду. Используется для симуляции движения робота, планирования задачи роботу и определения положения баз роботов. Модуль построения пространственной карты – обязательный модуль устройства смешанной реальности, он позволяет добавлять эффект окклюзии для цифровых объектов, то есть часть виртуальной модели робота может быть перегорожена физическим препятствием для восприятия пространственного положения человеком. Помимо этого, пространственная карта позволяет виртуальным роботам выполнять более корректную симуляцию движения с учетом геометрии рабочего пространства, это дает возможность детектировать столкновения. Также пространственная карта позволяет выполнять установку задачи роботу прямо на поверхность физических объектов или путем анализа пространства построить кратчайший путь между двумя контрольными точками для робота. Анализ пространственной карты в модуле «Система трансформаций» позволяет определить местоположение робота относительно системы смешанной реальности.

Модуль отслеживания человека – модуль детектирования действий, положения кистей рук и головы человека. Может быть расширен дополнительными системами слежения (например, детектирование направления взгляда или жестов). Это позволяет построить мультимодальный интерфейс взаимодействия с 3D-объектами в системе смешанной реальности.

Планировщик задач – модуль, отвечающий за формирование задачи на исполнение роботу. Например, для робототехнического манипулятора формирует и передает декартовый путь на движение инструмента робота. Основной модуль системы взаимодействия с роботами принимает на вход команды из интерфейса и положение виртуального робота. Внутри содержит информацию и модель постановки задачи

для конкретного робота. В контексте взаимодействия с промышленными роботами формирует набор команд робота на линейное перемещение между заданными через интерфейс контрольными точками. Передает задачу на выполнение роботу с учетом определенного заранее положения реального робота.

Система трансформаций – модуль, содержащий информацию о дереве трансформаций системы и алгоритмы для определения трансформации от системы координат смешанной реальности до роботов. Модуль модифицирует координаты задачи робота из системы координат системы смешанной реальности в координаты системы управления робота. Основной модуль системы взаимодействия с роботами на вход принимает информацию о пространственной карте, на выходе отправляет положения базовых систем координат роботов относительно системы координат смешанной реальности.

Контроллеры роботов обозначены в виде абстрактного набора блоков – к ним относятся блоки планирования траектории или блоки глобального и локального планирования пути, в зависимости от модели робота. У роботов также есть аппаратные части, а именно – исполнительные механизмы и датчики, которые отправляют данные виртуальным роботам.

#### Алгоритм работы системы

Работа системы подразумевает следующие этапы:

1. Согласование систем координат всех роботов и устройства смешанной реальности. Происходит определение положения всех роботов относительно системы координат смешанной реальности. В результате все элементы могут работать в одном общем пространстве.

2. Формирование задачи роботу через интерфейс и модуль планирования задач.

3. Выполнение роботом планирования траектории или глобального пути движения; эта информация отправляется на виртуальных роботов, которые визуализируют ее в смешанной реальности.

4. Оценка человеком корректности понимания роботом поставленной задачи. Если траектория устраивает оператора, то отправляется команда на запуск физического робота, иначе возврат к шагу 2.

5. Исполнение программы роботом и физическое взаимодействие с человеком.

Предложенный алгоритм описан для сценариев супервизорного управления сервисным

роботом и программирования промышленных роботов. Основное отличие этих двух сценариев в том, что в супервизорном управлении задача для робота меняется несколько раз на входе взаимодействия после ее выполнения роботом, а в программировании задается одна задача-программа с продолжительным ее повторением, не меняющаяся в ходе взаимодействия.

#### Заключение

В статье предложена новая модель взаимодействия человека и робота на основе интерфейса смешанной реальности, которая приводит к единому интерфейсу взаимодействия процесса постановки задачи и процесса взаимодействия с роботом во время выполнения задачи. В соответствии с новой моделью предложена новая архитектурная модель для программно-алгоритмической реализации системы взаимодействия робота и человека в сценариях программирования робота и супервизорного управления роботами. Предложенная система впервые позволит управлять через единый интерфейс предметами реального мира (роботами), используя иммерсионные технологии смешанной реальности.

УДК 629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-66-75

*И. С. Пеньшин, В. В. Гулевский, Н. Г. Шаронов*

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ С ЯКОРНО-ТРОСОВЫМИ И ЯКОРНО-ТРОСОВО-ГУСЕНИЧНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ\*

Волгоградский государственный технический университет

Darklight983@gmail.com

Анализируются экспериментальные результаты, полученные с помощью физического моделирования перемещения плавающего робота-понтон в искусственном водоеме. Рассматриваются два типа движителей: якорно-тросовый и якорно-тросово-гусеничный.

*Ключевые слова:* подводная платформа, положительная плавучесть, якорно-тросовый движитель, подводный мобильный робот.

*I. S. Penshin, V. V. Gulevskiy, N. G. Sharonov*

#### RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE MOTION OF MOBILE UNDERWATER ROBOTS WITH ANCHOR-ROPE AND ANCHOR-ROPE-CATERPILLAR PROPULSION DEVICE

Volgograd State Technical University

The experimental results obtained with the help of physical simulation of the movement of a floating pontoon robot in an artificial reservoir are analyzed. Two types of propellers are considered: anchor-rope and anchor-rope-caterpillar.

*Keywords:* underwater platform, positive buoyancy, anchor-rope propulsion device, underwater mobile robot.

© Пеньшин И. С., Гулевский В. В., Шаронов Н. Г., 2022.

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01589, <https://rscf.ru/project/22-29-01589/>

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications / V. Villani et al. // *Mechatronics*. – 2018. – V. 55. – P. 248–266.
2. Communicating robot motion intent with augmented reality / M. Walker et al. // *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 2018. – P. 316–324.
3. Intuitive robot tasks with augmented reality and virtual obstacles / A. Gaschler et al. // *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. – IEEE, 2014. – P. 6026–6031.
4. Intuitive robot programming using augmented reality / S. Blankemeyer et al. // *Procedia CIRP*. – 2018. – V. 76. – P. 155–160.
5. *Speicher, M.* What is mixed reality? / M. Speicher, B. D. Hall, M. Nebeling // *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*, 2019. – P. 1–15.
6. Multi robots interactive control using mixed reality / M. Ostanin et al. // *International Journal of Production Research*. – 2021. – V. 59. – № 23. – P. 7126–7138.
7. Mixed reality for robotics / W. Hoenig et al. // *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. – IEEE, 2015. – P. 5382–5387.
8. Communicating and controlling robot arm motion intent through mixed-reality head-mounted displays / E. Rosen et al. // *The International Journal of Robotics Research*. – 2019. – V. 38. – № 12–13. – P. 1513–1526.

**Введение**

Перспективными движителями роботопонтонов для освоения океанического дна, благодаря высоким показателям профильной проходимости, являются шагающие движители различного конструктивного исполнения. Среди них конструктивной простотой и простотой системы управления выделяются якорно-тросовые движители, установленные на роботопонтоне с небольшой положительной плавучестью [1–4] и якорно-тросово-гусеничные движители, представляющие из себя симбиоз двух типов движителей – якорно-тросового и гусеничного [5–8].

**1. Описание кинематических схем и работы движителей**

**1.1. Якорно-тросовый движитель**

Общий вид робота-понтон с якорно-тросовым движителем представлен на рис. 1, кинематическая схема – на рис. 2. Якорно-тросовый движитель работает следующим образом: движителем является якорь, двумя тросами 2, 3 связанный с вращающимися в соответствии с определенными законами барабанами. Под якорем понимается массивное тело произвольной формы, находящееся на дне. Якорь 1 зацепляется с грунтом 7 и соединяется с тяговым тросом 2 и несущим тросом 3, которые соединены с маховиками 4. В начале движения тяговый трос 2 тянет за собой весь робот к якорю 1, пока трос 2 не займет вертикальное положение. После этого трос 2 начинает поднимать якорь 1 и в определенный момент включается маховик с тросом 3, который переводит якорь 1 в исходное положение, описывая траекторию б. Таким образом, циклически происходит движение якорно-канатного движителя.

Общий вид робота-понтон с якорно-тросовым движителем представлен на рис. 1, кинематическая схема – на рис. 2. Якорно-тросовый движитель работает следующим образом: движителем является якорь, двумя тросами 2, 3 связанный с вращающимися в соответствии с определенными законами барабанами. Под якорем понимается массивное тело произвольной формы, находящееся на дне. Якорь 1 зацепляется с грунтом 7 и соединяется с тяговым тросом 2 и несущим тросом 3, которые соединены с маховиками 4. В начале движения тяговый трос 2 тянет за собой весь робот к якорю 1, пока трос 2 не займет вертикальное положение. После этого трос 2 начинает поднимать якорь 1 и в определенный момент включается маховик с тросом 3, который переводит якорь 1 в исходное положение, описывая траекторию б. Таким образом, циклически происходит движение якорно-канатного движителя.

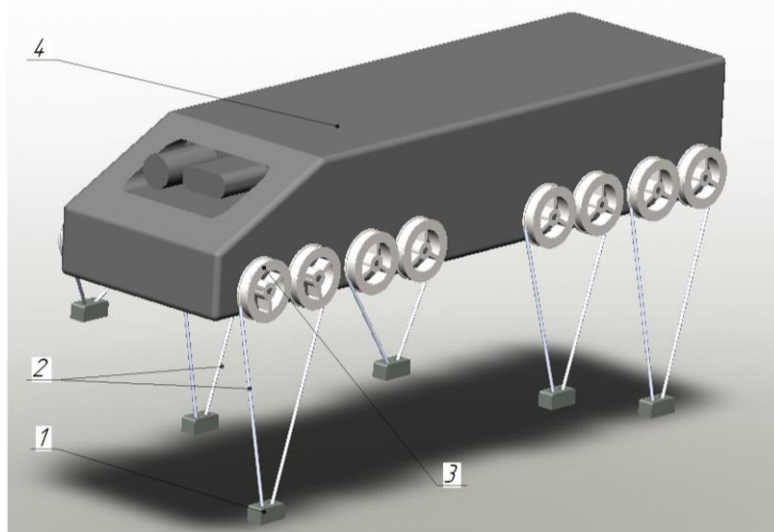


Рис. 1. Общий вид и устройство платформы с якорно-тросовым движителем:  
1 – якорь (стопа); 2 – тросы; 3 – маховик; 4 – корпус с системой управления и системой машинного зрения

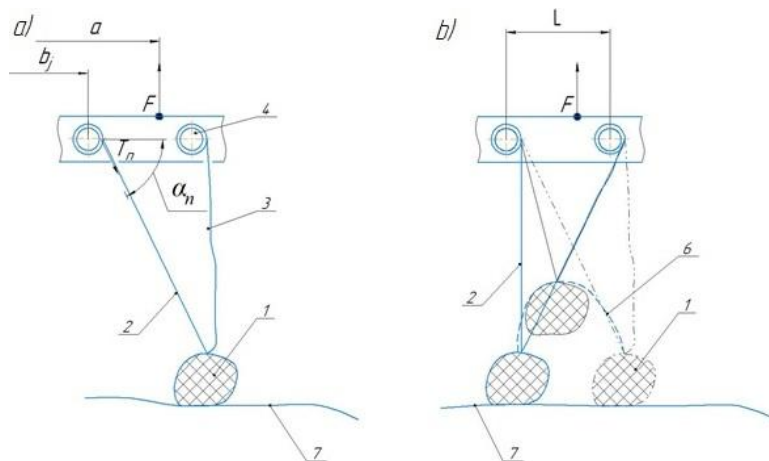


Рис. 2. Кинематическая схема движения якорно-тросового движителя:  
1 – якорь; 2 – тянущий трос; 3 – переносящий трос; 4 – маховик; 5 – груз

### 1.2. Якорно-тросово-гусеничный движитель

Якорно-тросово-гусеничный движитель для мобильной платформы 1 представлен на рис. 3. Движитель состоит из рамы 2 с попарно установленными на ней механизмами продольного перемещения 3, с помощью которых рама 2 крепится к мобильной платформе 1, а также фиксируется в заданном положении относительно нее. По периметру рамы 2 расположены ролики 4, по которым движется гибкий цепной транспортер 5. Один из роликов 4 приводится в движение двигателем (не показан) и является ведущим. На транспортере 5 на тросах 6 равномерно по всей длине транспортера подвешены якоря 7.

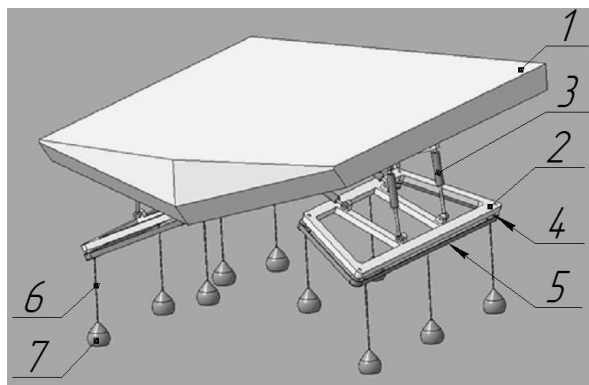


Рис. 3. Якорно-гусенично-тросовый движитель:  
1 – мобильная платформа; 2 – рама; 3 – механизм перекоса;  
4 – ролик; 5 – транспортер; 6 – трос; 7 – якорь

Перемещение происходит следующим образом: с помощью механизмов продольного перемещения 3 рама 2 занимает положение с уг-

лом  $\alpha$  относительно плоскости дна. Поворот на заданный угол относительно горизонта обеспечивает различный клиренс между дном водоема и рамой. Транспортер 5 вращается по направлению движения платформы 1; якоря 7, находящиеся на звеньях транспортера 5, расположенных ближе к дну, опущены на дно; длина тросов 6 фиксирована и остается неизменной, за счет этого вторая часть якорей 7, находящихся на звеньях транспортера 5 дальше от дна, его не касается. За счет перемотки транспортера 5 якоря 7, находящиеся на разных звеньях транспортера, постепенно меняют своим положением, подтягивая платформу 1 в сторону движения [5].

### 2. Постановка задачи

Ставится задача разработки экспериментальных установок и методик проведения исследований с целью установления корреляции результатов, полученных экспериментальным путем и методами имитационного моделирования.

### 3. Описание экспериментальной установки

В соответствии с поставленными задачами был разработан лабораторный прототип платформы-понтон с положительной плавучестью, который позволяет производить реконфигурацию для использования и испытания двух типов движителей, предполагая незначительные конструктивные изменения и небольшое изменение программного обеспечения при замене типа движителя.

Лабораторная модель робота-понтон представлена на рис. 4.

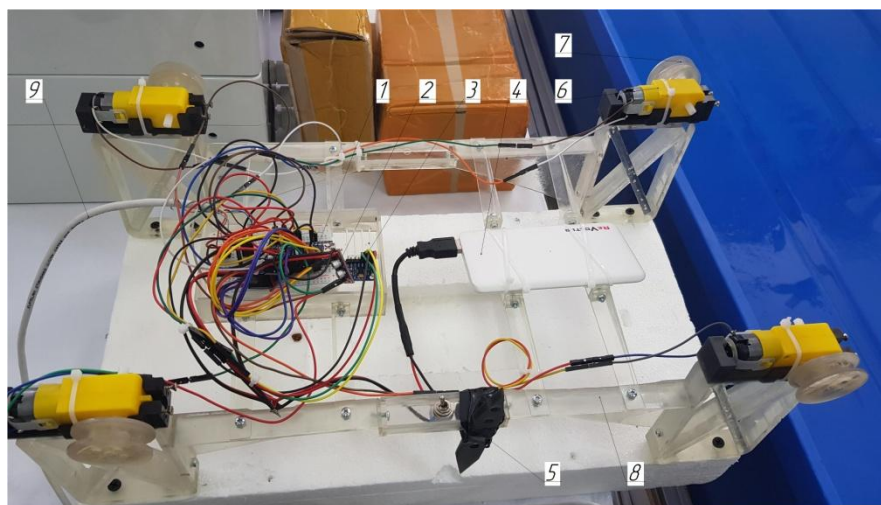


Рис. 4. Реконфигурируемая лабораторная модель робота-понтон для двух типов движителей:  
1 – плата Arduino с микроконтроллером; 2 – драйвер для управления двигателями постоянного тока; 3 – модуль гироскопа;  
4 – аккумуляторная батарея; 5 – тумблер включения/выключения; 6 – двигатель постоянного тока; 7 – шкив; 8 – монтажная рама;  
9 – кабель на пульт управления

Стенд приводится в рабочее состояние переключением тумблера 5. На плате Arduino 1 записана программа управления для предпочтительного типа движителя, который будет применен для эксперимента. С пульта управления через кабель 9 поступает сигнал на плату 1, затем на драйверы 2 и далее уже на двигатели постоянного тока 6, которые приводят в движение шкивы 7. Вся установка расположена на монтажной раме 8, которая имеет положительную плавучесть. Питание всей установки происходит от аккумулятора 4. После начала дви-

жения модуль гироскопа 3 передает данные на ЭВМ об ускорениях, скоростях и углах отклонения платформы-понтон.

### 3.1. Экспериментальная установка с якорно-тросовым движителем

#### 3.1.1. Описание лабораторной установки с якорно-тросовым движителем

Лабораторный стенд для проведения экспериментальных исследований с якорно-тросовым движителем представлен на рис. 5. На стенде расположены четыре модуля движителя с тросами и якорями.

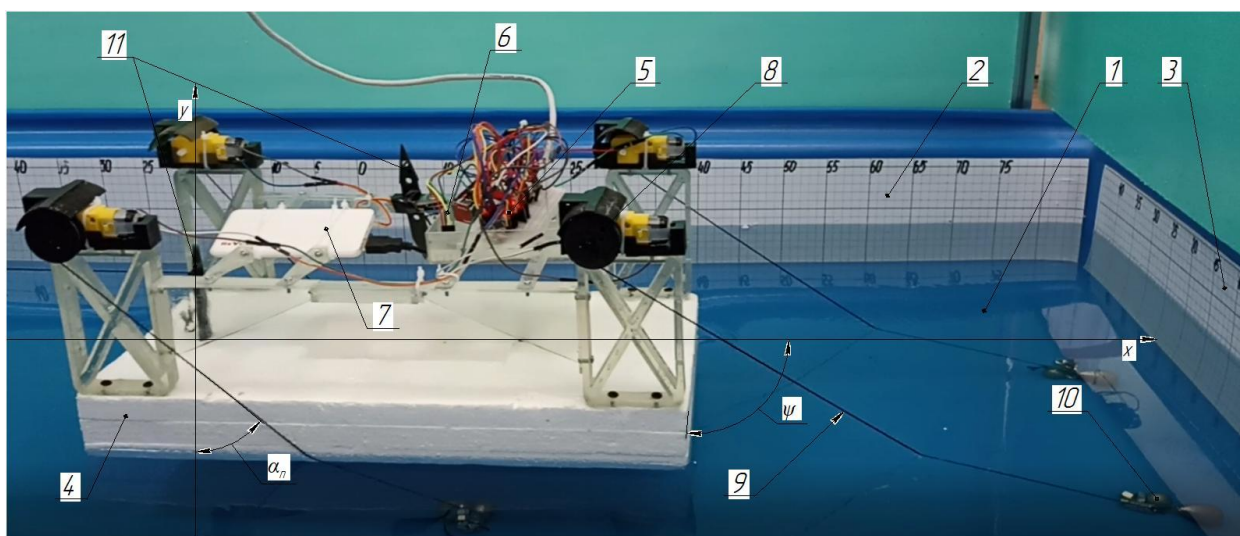


Рис. 5. Лабораторный стенд для испытаний робота-понтон с якорно-тросовым движителем:

1 – искусственный водоем; 2 – шкала продольного перемещения; 3 – шкала поперечного перемещения; 4 – платформа-понтон; 5 – плата управления роботом-понтон; 6 – модуль гироскопа и акселерометра; 7 – аккумуляторная батарея; 8 – модуль якорно-тросового движителя; 9 – трос; 10 – якорь; 11 – индикаторы-целеуказатели;  $\alpha_n$  – угол отклонения троса от вертикальной оси;  $\psi$  – угол отклонения платформы от горизонтальной оси (угол рыскания)

В ходе эксперимента изменялись углы отклонения троса от вертикальной оси  $\alpha_n$  для каждого модуля; фиксировались характеристики походки при каждой конфигурации параметров, таких как угол отклонения, сила сопротивления движению  $Q$ , скорость передвижения, симметричность расположения грузов.

#### 3.1.2. Методика проведения эксперимента

Эксперимент проводился путем фото- и видеофиксации движения установки с заранее известными параметрами. Для получения объективных данных видеокamеры были расположены с двух сторон искусственного водоема,

что позволяло фиксировать перемещения в продольном и поперечном направлениях. При проведении эксперимента на бортах водоема были заранее нанесены координатные сетки для отслеживания перемещений с помощью целеуказателей, расположенных на платформе-понтоне. Далее, после покадровой обработки видеозаписей и данных, полученных с помощью модуля гироскопа, данные были синхронизированы по времени и затем был проведен их анализ.

Схема получения экспериментальных данных представлена на рис. 6. Вид сверху на рис. 6 показан для наглядности.

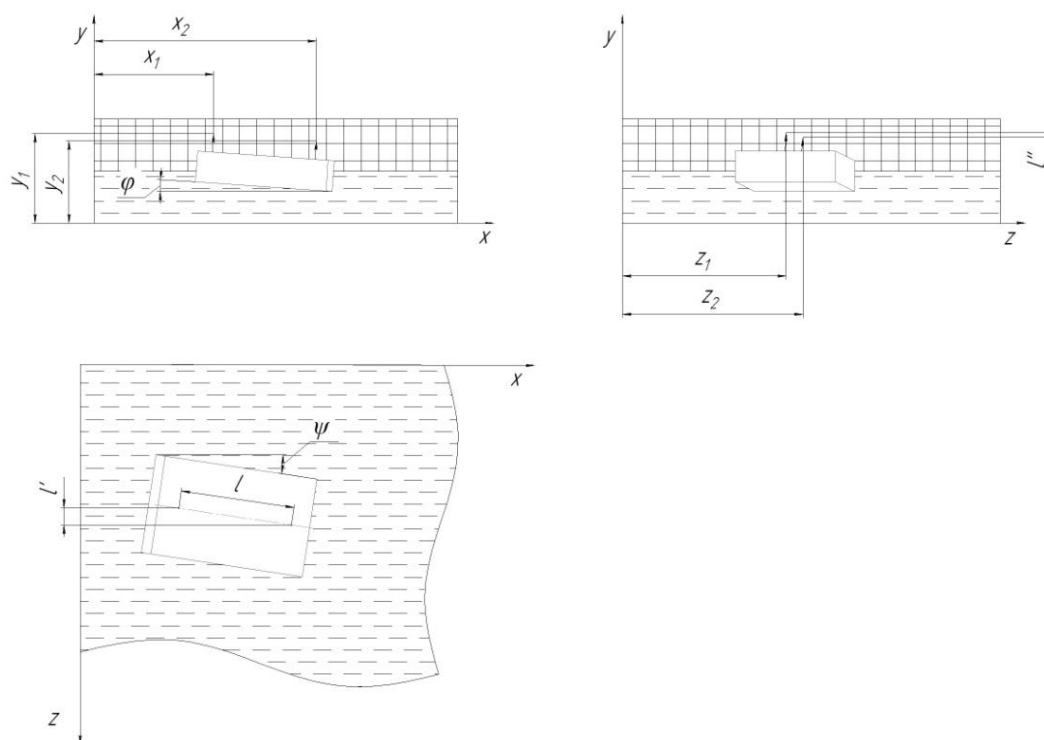


Рис. 6. Схема проведения эксперимента для якорно-тросового движителя:  
 $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$  – координаты целеуказателей;  $\varphi$  – угол дифферента;  $\psi$  – угол рыскания;  $l$  – расстояние между целеуказателями;  
 $l'$  – расстояние между целеуказателями в горизонтальной проекции на ось  $z$ ;  $l''$  – расстояние между целеуказателями  
 в вертикальной проекции на ось  $y$

### 3.1.3. Обработка результатов эксперимента

В табл. 1 представлены результаты серии экспериментов при одинаковом угле отклонения  $\alpha_n$ , что соответствует равномерному распределению, рассмотренному ранее [4]. Полученные графики соответствуют ранее рассмотренным теоретическим задачам. На рис. 7, а показан график изменения скорости, незначительные колебания в котором объясняются задержками при передаче сигнала внутри системы, что позволяет считать движение равномерным. На рис. 7, б показаны изменения угла крена, незначительные отклонения которого также характеризуют платформу-понтон с якорно-тросовым движителем, как способную к равномерному прямолинейному движению. Изменения угла рыскания, показанные на рис. 7, в, также характеризуют движение, как приближенное к прямолинейному с колебаниями в околонулевой точке.

Экспериментальные данные были рассчитаны по следующим формулам:

$$\varphi = \frac{y_1 - y_2}{l'}; \quad \psi = \frac{z_1 - z_2}{l''}. \quad (1)$$

Значения скорости  $v$  получены путем сопоставления таймкода с видеозаписи и координаты заднего целеуказателя в каждый момент времени при движении.

Таблица 1  
 Результаты экспериментального исследования якорно-тросового движителя

$T, c$	$v, m/c$	$\varphi, град$	$\psi, град$
0	0	0	0
0,25	0,02	0	0,5
0,5	0,041	0,01	1,3
0,75	0,078	0,02	1,8
1	0,1	-0,01	0,8
1,25	0,093	0,03	0,12
1,5	0,11	-0,01	-0,7
1,75	0,09	0,02	-0,95
2	0,11	-0,04	-1,4
2,25	0,103	0,05	-1,1
2,5	0,095	0,03	0,3
2,75	0,1	-0,02	0,68
3	0,102	-0,017	0,93
3,25	0,104	0,02	2,03
3,5	0,092	0,05	2
3,75	0,098	0,08	1,2
4	0,096	-0,04	0,3
4,25	0,1	0,05	-0,65
4,5	0,112	-0,04	-1,51
4,75	0,98	0,03	-2,03
5	0,1	-0,1	-2,9



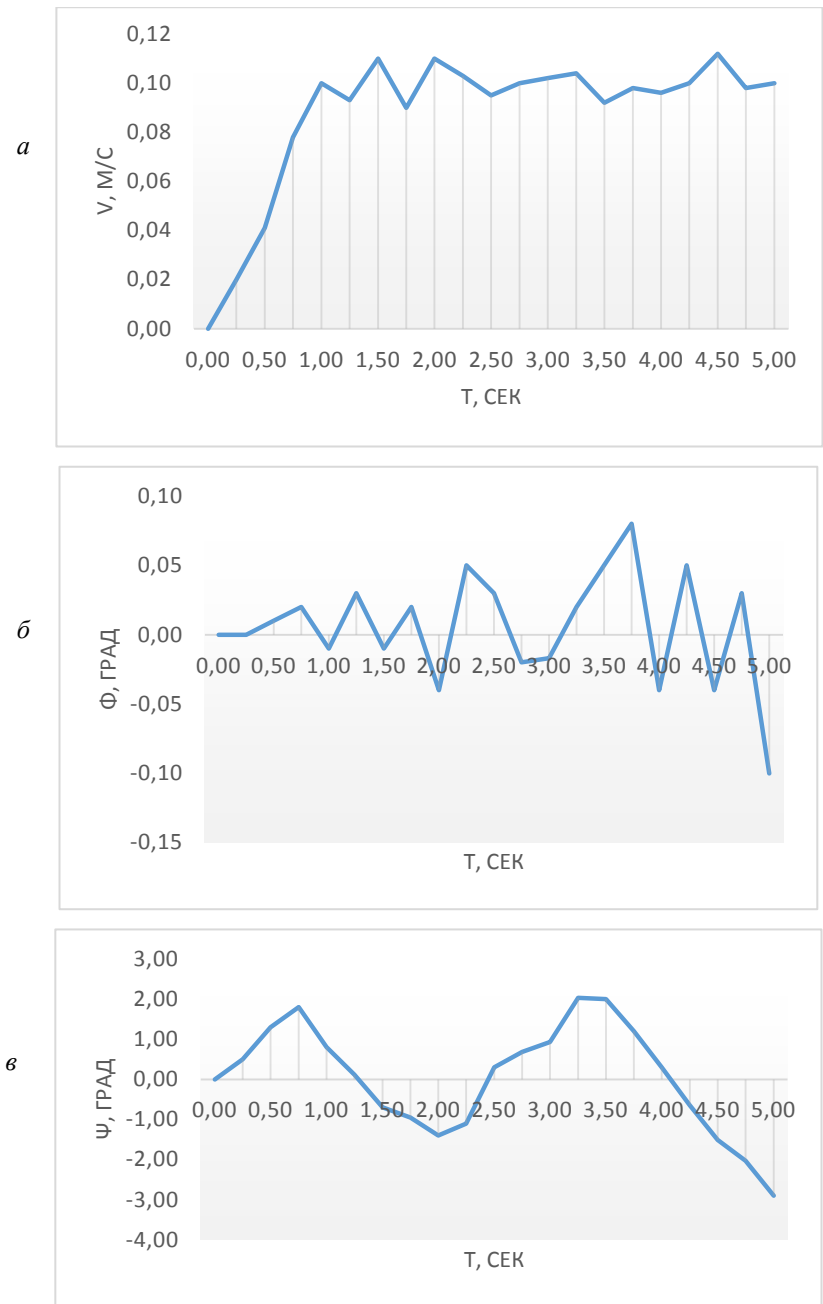


Рис. 7. Экспериментальные данные:  
*а* – график изменения скорости; *б* – график изменения угла крена; *в* – график изменения угла рыскания

**3.2. Экспериментальная установка с якорно-тросово-гусеничным движителем**

3.2.1. Описание лабораторной модели с якорно-тросово-гусеничным движителем

На рис. 8 представлен лабораторный стенд, сконфигурированный для испытаний якорно-тросово-гусеничного движителя. Установлены гусеничные транспортеры с зафиксированными

на них с помощью тросов якорями. В ходе эксперимента количество якорей, подвешенных на гусеницу, менялось; также фиксировались характеристики движения робота-понтон при различной скорости и при симметричном и асимметричном расположении точек закрепления якорей на гусеничном транспортере относительно длины робота-понтон.

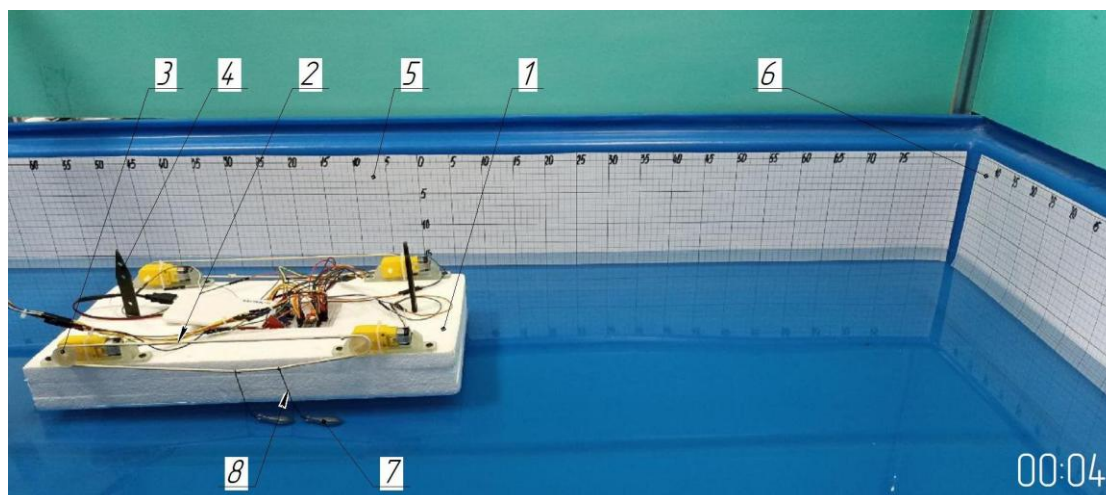


Рис. 8. Лабораторный стенд для испытаний робота-понтон с якорно-тросово-гусеничным движителем: 1 – корпус модели робота-понтон; 2 – гусеничный транспортер; 3 – ролик на валу ведущего двигателя; 4 – целеуказатель, предназначенный для фиксации перемещения мобильной платформы; 5, 6 – координатные сетки на бортах искусственного водоема; 7 – якорь; 8 – трос

### 3.2.2. Методика проведения эксперимента

Исследование динамики движения робота-понтон производилось методом видеосъемки с последующей кадровой обработкой на ЭВМ. Для получения видеозаписей с двух сторон от искусственного водоема были установлены камеры. На борта искусственного водоема напротив камер были нанесены координатные сетки, на которых на видеозаписи легко определялась проекция целеуказателей, расположенных на мобильной платформе на одной оси. Это позволяло во время движения робота-

понтон непрерывно фиксировать смещение платформы относительно неподвижных бортов искусственного водоема. Две видеокamеры работали в режиме секундного отсчета времени, что при обработке позволило синхронизировать показания с различных ракурсов.

Экспериментальные данные обрабатывались после оцифровки видеоизображения с захватом отдельных кадров. Затем полученные данные анализировались. Схема лабораторной установки представлена на рис. 9. Вид сверху на рис. 9 показан для наглядности.

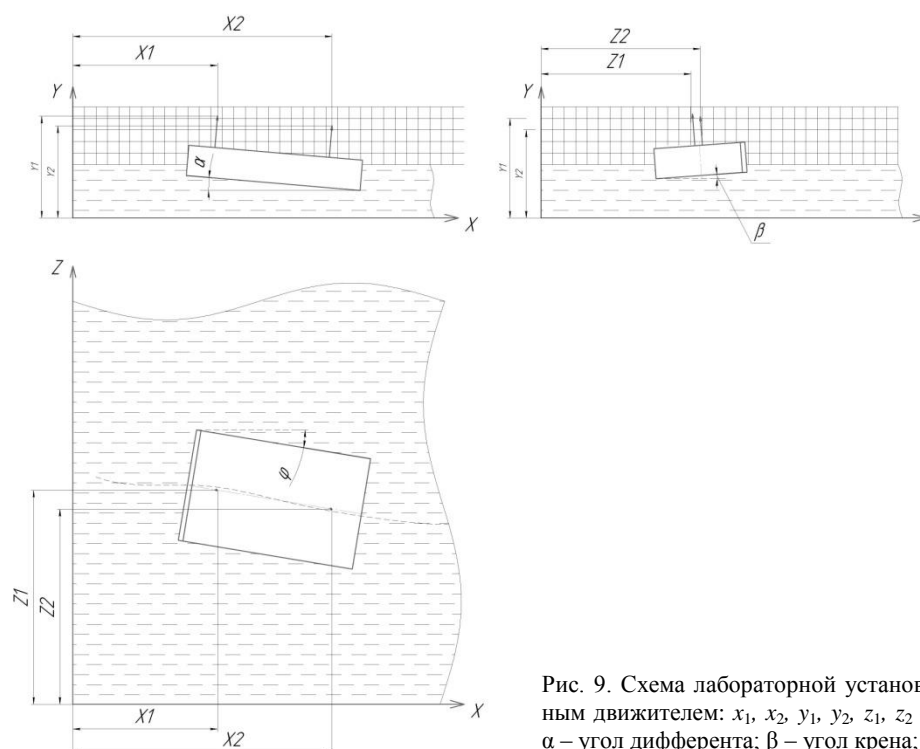


Рис. 9. Схема лабораторной установки с якорно-тросово-гусеничным движителем:  $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$  – координаты целеуказателей;  $\alpha$  – угол дифферента;  $\beta$  – угол крена;  $\varphi$  – угол рыскания

3.2.3. Обработка экспериментальных данных

Таблица 2

Результаты одного из экспериментов

$t, c$	$v, м/с$	$\alpha$	$\Phi_{сим}$	$\Phi_{асим}$
0	0	0	0	0
0,25	0,03	-0,11	0,6	-1,1
0,5	0,04	-0,16	1,2	-1,9
0,75	0,07	-0,14	1,8	-2,9
1	0,1	-0,17	0,9	-1,1
1,25	0,09	0,14	0,1	0,25
1,5	0,12	0,19	-0,5	1,3
1,75	0,095	0,12	-0,95	2,6
2	0,1	-0,09	-1,6	3,5
2,25	0,105	-0,18	-1,1	3,6
2,5	0,098	-0,16	0,2	2,7
2,75	0,103	0,15	0,65	1,6
3	0,1	0,17	0,97	-0,5
3,25	0,104	0,16	2,21	-0,68
3,5	0,097	0,13	2	-2,3
3,75	0,098	0,08	1,2	-3,1
4	0,096	-0,04	0,4	-4,3
4,25	0,1	0,05	-0,6	-2,6
4,5	0,11	0,04	-1,5	-1,1
4,75	0,13	0,03	-2	-1,9
5	0,1	-0,1	-2,9	-2,6

Полученные при проведении одного из экспериментов данные сведены в табл. 2, а также представлены на рис. 10. График на рис. 10, *a* отражает изменение скорости робота-понтон в течение эксперимента. На графике изменения дифферента (рис. 10, *б*) видны волнообразные колебания угла  $\alpha$ , что подтверждает расчетные данные [6, 7].

На графике 10, *в* представлены изменения угла рыскания  $\phi$ . Рисунок отражает рыскание мобильной платформы при симметричном расположении точек подвеса якорей вдоль платформы для левого и правого движителя, а также для ассиметричного расположения точек подвеса, что позволяет сделать вывод о предпочтительности симметричного расположения точек закрепления подвесов якорей. Значения  $v$ ,  $\alpha$ ,  $\Phi_{сим}$  и  $\Phi_{асим}$  получены с помощью формул аналогичными (1).

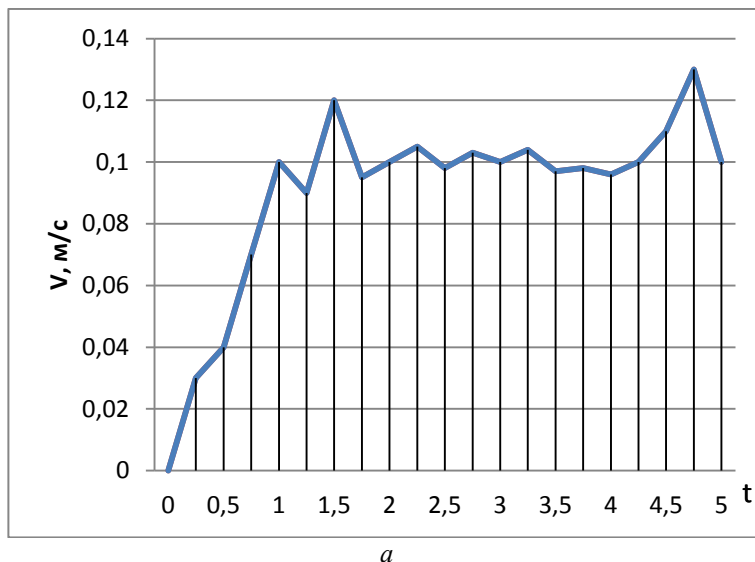


Рис. 10. Экспериментальные данные:  
*a* – график скорости; *б* – угол дифферента; *в* – углы рыскания  
 (см. также с. 74)

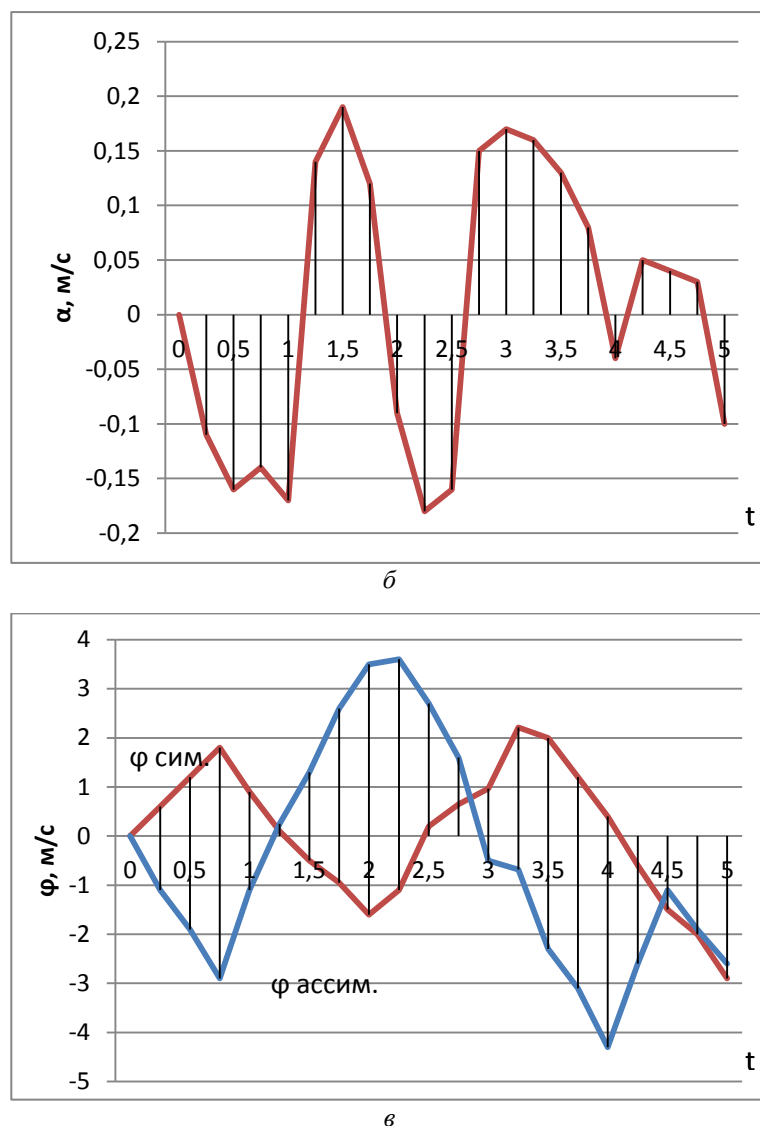


Рис. 10. Окончание

### Выводы

Робот-понтон как с якорно-тросовым, так и с якорно-тросово-гусеничным движителем способен к устойчивому поступательному движению, что подтверждает выведенные математические зависимости и расчеты. Разработанная лабораторная установка позволяет испытывать новые типы движителей и снимать необходимые характеристики. Предметом дальнейших исследований, выполненных на данной лабораторной установке, будет движение робота-понтон по дну с неоднородным рельефом. Рассматривались случаи прямолинейного равномерного движения, аналогично теоретическим расчетам. Полученные результаты подтверждают полученные ранее расчетные данные.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми движителями / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов, В. А. Серов, И. С. Пеньшин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 39–45.
2. Определение усилий в движителях якорно-тросового типа / Е. С. Брискин, И. С. Пеньшин, Л. Д. Смирная, Н. Г. Шаронов // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 14(209) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 87–90.
3. Об особенностях управления движением мобильных роботов с движителями якорно-тросового типа / Е. С. Брискин, В. А. Серов, Н. Г. Шаронов, И. С. Пеньшин // Экстремальная робототехника. – 2017. – Т. 1. – № 1. – С. 336–343.
4. Пеньшин, И. С. Об управлении поступательным движением робота-понтон с якорно-тросовыми движителями / И. С. Пеньшин // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 4(263) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия

«Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 43–48.

5. П. м. 204261 U1 Российская Федерация, МПК В63Н 25/00. Двигатель для мобильной платформы / Е. С. Брискин, В. В. Гулевский, Н. Г. Шаронов, В. А. Серов ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет». – № 2021102367 : заявл. 02.02.2021 : опубл. 17.05.2021.

6. *Гулевский, В. В.* Распределение тяговых усилий подводного робота с якорно-тросово-гусеничными движителями, взаимодействующими с поверхностью производного профиля / В. В. Гулевский // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(263) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические сис-

темы»). – С. 19–25.

7. *Гулевский, В. В.* О квазистатических режимах движения подводных мобильных роботов с якорно-тросово-гусеничными движителями / В. В. Гулевский // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(256) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 26–31.

8. *Briskin, E. S.* About features of management of mobile robots with stepping movers of a rope type in a water environment / E. S. Briskin, V. V. Gulevsky, I. S. Penshin, N. G. Sharonov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference of Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering", ToPME 2019, Moscow, 4-6 декабря 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012080.

УДК 629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-75-79

*Л. Д. Смирная, Е. С. Брискин*

## О ПОСТРОЕНИИ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩИХ ДВИЖИТЕЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В ФАЗЕ ПЕРЕНОСА\*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

Рассмотрен метод формирования уравнений движения переноса шагающих движителей в новое положение, опирающийся на задаваемую траекторию переноса и соотношение между усилиями, развиваемыми приводами, обеспечивающими устойчивость программного движения.

*Ключевые слова:* шагающий движитель, траектория переноса, программное движение, голономные связи.

*L. D. Smirnaya, E. S. Briskin*

## ON THE CONSTRUCTION OF EQUATIONS OF MOTION OF WALKING MOBILE ROBOT PROPULSION DEVICES IN THE TRANSFER PHASE

Volgograd State Technical University

The method of forming the equations of motion of the transfer of walking propulsion devices to a new position is considered, based on the specified trajectory of the transfer and the ratio between the forces developed by the drives, ensuring the stability of the program movement.

*Keywords:* walking mover, transfer trajectory, program motion, holonomic connections.

### Введение

Известны различные способы формирования программных движений шагающих движителей в фазе переноса. Один из первых вариантов выбора траектории движения опорной стопы шагающего движителя был предложен Н. В. Умновым; он состоял в организации строго вертикального ее перемещения на этапе отрыва от опорной поверхности на высоту, превышающую предполагаемое препятствие. В курсовом движении опора перемещается горизонтально, а при опускании до взаимодействия с опорной поверхностью траекторией также является вертикальный отрезок прямой (рис. 1) [1].

Такой вид траектории объясняется несовершенством информационно-измерительной системы для идентификации возможных препятствий и необходимостью взаимодействия с опорной поверхностью стопы без ее проскальзывания на этой поверхности. Известны и другие методы построения движений стопы в фазе переноса: на основе минимума уровня тепловых потерь в приводных двигателях [2, 3, 4] или минимума комплексного критерия, характеризующего качество движения [5, 6], и др. Это приводит к дифференциальным уравнениям четвертого порядка и требует задания четырех начальных или граничных условий. Однако

© Смирная Л. Д., Брискин Е. С., 2022.

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

возможно и решение задачи на основе формирования программной траектории в форме уравнения голономной связи [7, 8]. В данном случае обычно используют уравнения Лагранжа с неопределенными множителями. При этом используется принцип освобожденности от связей [9] и гипотеза об их идеальности. Гипотезу об идеальности можно и не применять, а использовать другие условия, накладываемые на реакции связей, обусловленных заданием программной траектории. Например, ввести определенные соотношения между усилиями, развиваемыми приводами, обеспечивающими

задаваемое программное движение [10, 11].

#### Постановка задачи

Рассматривается перемещение стопы движителя массы  $m$  в вертикальной плоскости при переносе в новое положение (рис. 1).

На основании оценки профиля опорной поверхности информационно-измерительной системой задается программная траектория движения в форме уравнения голономной связи

$$y = f(x). \quad (1)$$

Причем  $y = 0$  при  $x = 0$ ;  $x = L$ , где  $L$  – длина шага.

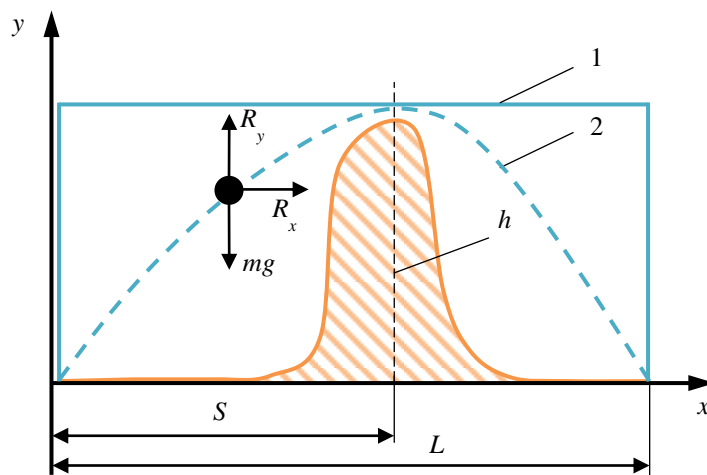


Рис. 1. Расчетная схема преодоления препятствия шагающим движителем:  
1 – траектория по Н. В. Умнову; 2 – программная траектория;  $R_x$ ,  $R_y$  – реакции связей;  $mg$  – вес стопы

Реакции связей  $R_x$ ,  $R_y$  формируются приводами. Так, для шагающей машины «Ортоног» [12] (рис. 2) эти реакции непосредственно равны усилиям, развиваемым приводами горизонтального и вертикального перемещения. Для роботов-понтонных с якорно-тросовыми движителями (рис. 3) реакции определяются уравнениями [13]

$$\begin{cases} R_x = -T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2, \\ R_y = T_1 \sin \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $T_1$ ,  $T_2$  – усилия натяжения тросов, развиваемые приводами движителей;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – углы, обра-

зованные тросами с горизонтом и зависящие от положения стопы (якоря) в соответствии с (1).

Задается соотношение между реакциями

$$R_y = \rho(x)R_x, \quad (3)$$

где  $\rho(x)$  – задаваемая функция, допускающая последующее изменение в зависимости от результатов анализа полученного решения.

Ставится задача составления уравнений движения стопы как материальной точки, получения решения и рекомендаций по выбору функции  $\rho = \rho(x)$ .



Рис. 2. Шагающая машина «Ортоног». Преодоление препятствия на полевых испытаниях

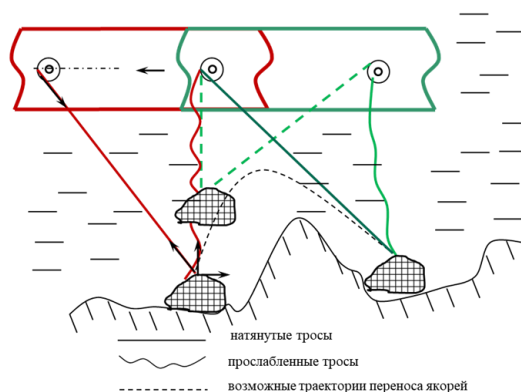
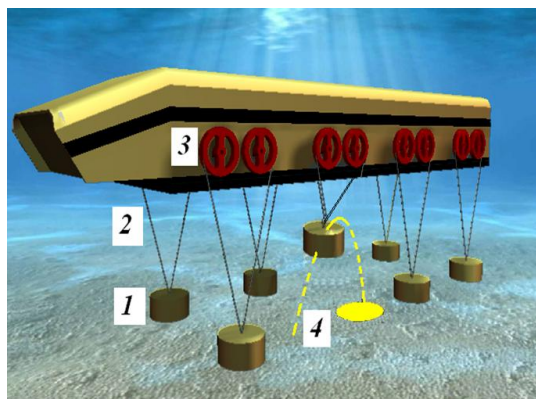


Рис. 3. Мобильная подводная платформа с якорно-тросовыми двигателями:  
1 – якорь; 2 – трос; 3 – управляемые маховики; 4 – траектория переноса якоря

**Метод решения**

Метод решения основан на применении уравнений динамики, составляемых для материальной точки; принципа освобождения от связи (1) и учета соотношения между реакциями связи (3)

$$\begin{cases} m\ddot{x} = R_x \\ m\ddot{y} = R_y - mg \\ y - f(x) = 0 \\ R_y = \rho(x)R_x \end{cases} \quad (4)$$

Совместное решение системы уравнений (4) позволяет получить дифференциальное уравнение движения стопы вдоль оси  $Ox$ :

$$\begin{cases} T_1 = \frac{R_y \cos \alpha_2 - R_x \sin \alpha_2}{\cos(\alpha_2 - \alpha_1)}; \\ T_2 = \frac{R_y \cos \alpha_1 + R_x \sin \alpha_1}{\cos(\alpha_2 - \alpha_1)}; \\ \cos \alpha_1 = \frac{x}{\sqrt{(1-y)^2 + x^2}}; \quad \sin \alpha_1 = \frac{H-y}{\sqrt{(H-y)^2 + x^2}}; \\ \cos \alpha_2 = \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + (H-y)^2}}; \quad \sin \alpha_2 = \frac{H-y}{\sqrt{(l-x)^2 + (H-y)^2}}. \end{cases} \quad (6)$$

**Исследование устойчивости программного движения**

Задача исследования устойчивости движения является одной из ключевых при разработ-

$$\ddot{x} = \frac{R_x}{m} = \frac{g + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \dot{x}^2}{\rho(x) - \frac{\partial f}{\partial x}} \quad (5)$$

ке шагающих машин [14–16]. Для исследования устойчивости описываемого дифференциальным уравнением (5)  $x_{np}(t)$  составляются уравнения в вариациях

$$\begin{aligned} & \left[ \rho(x_{np} \dot{x}_{np}) - \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_{np}} \right] \delta \ddot{x} + \left[ \frac{\partial \rho}{\partial \dot{x}} \Big|_{x_{np}} \dot{x}_{np} - 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Big|_{x_{np}} \dot{x}_{np} \right] \delta \dot{x} + \\ & + \left[ \frac{\partial \rho}{\partial x} \Big|_{x_{np}} \dot{x}_{np} - \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Big|_{x_{np}} \dot{x}_{np} - \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \Big|_{x_{np}} \dot{x}_{np}^2 \right] \delta x = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

В общем случае дифференциальное уравнение (7) – это линейное неоднородное уравнение второго порядка относительно вариаций  $\delta x$  с переменными коэффициентами. Это затрудняет получение аналитического решения. Однако приближенную оценку устойчивости программного движения можно получить, заменяя функции времени их средними значениями.

Для этого вводятся средние значения переменных функций на интервале  $0 < t < \tau$  при изменении координаты  $0 < x < L$ . Если уравнением связи является функция

$$y = f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3, \quad (8)$$

$$(\rho_{\text{cp}} + b + cL + dL^2)\delta\ddot{x} + (-2c - 3dL)\frac{L}{\tau}\delta\dot{x} + (-6d\frac{L^2}{\tau^2})\delta x = 0. \quad (10)$$

В соответствии с критериями Гурвица [17] движение будет устойчивым, если

$$\begin{cases} \rho_{\text{cp}} + b + cL + dL^2 > 0 \\ -2c - 3dL > 0 \\ -6dL^2/\tau^2 > 0 \end{cases}. \quad (11)$$

В этом случае определяется одно, постоянное соотношение  $\rho_{\text{cp}}$  между усилиями  $R_x, R_y$ .

Другой вариант исследования устойчивости программного движения состоит в задании конкретной зависимости

$$x_{\text{np}} = x_{\text{np}}(t). \quad (12)$$

Тогда уравнение (7) может быть приведено к форме

$$\delta\ddot{x} + a(t)\delta\dot{x} + b(t)\delta x = 0, \quad (13)$$

где

$$\begin{cases} a(t) = \frac{\dot{\rho}(t)\ddot{x}_{\text{np}}(t) - \psi(t)\dot{x}_{\text{np}}(t)}{\rho(t)\ddot{x}_{\text{np}}(t) - \varphi(t)}, \\ b(t) = \frac{\rho(t)\ddot{x}_{\text{np}}(t) - \psi(t)\ddot{x}_{\text{np}}(t) - \mu(t)\dot{x}_{\text{np}}^2(t)}{\rho(t)\ddot{x}_{\text{np}}(t) - \psi(t)}, \\ \varphi(t) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_{\text{np}}(t)}, \\ \psi(t) = \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{x=x_{\text{np}}(t)} \dot{x}_{\text{np}}(t), \\ \mu(t) = \left. \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \right|_{x=x_{\text{np}}(t)} \dot{x}_{\text{np}}^2(t). \end{cases} \quad (14)$$

Анализ уравнения (13) с учетом (14) в зависимости от вида задаваемого программного движения стопы (12) и уравнения связи (1) состоит в определении соотношения между уси-

а скорость стопы в начале и конце переноса равна нулю, то

$$\begin{cases} \dot{x}_{\text{np}}|_{\text{cp}} = \frac{L}{\tau}; & \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\text{cp}} = b + cL + dL^2; \\ \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{\text{cp}} = 2c + 3dL; & \left. \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \right|_{\text{cp}} = 6d. \end{cases} \quad (9)$$

Тогда уравнение (7) допускает представление в форме дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами:

лиями, развиваемыми приводами, реализующими связь  $\rho = \rho(t)$ . Если задаться границами измерения – функциями  $a = a(t)$  и  $b = b(t)$

$$\begin{cases} a < a(t) < A, \\ b < b(t) < B, \end{cases} \quad (15)$$

то достаточные условия устойчивости имеют вид [17, 18]

$$\begin{cases} 4\sqrt{b} + a > \sqrt{a(2A - a)}, \\ \sqrt{B} - \sqrt{b} < a. \end{cases} \quad (16)$$

Таким образом, для определения программного управления соотношением между усилиями, развиваемыми приводами, следует опираться на неравенства (15), (16).

#### Выводы

Предложен метод формирования уравнений движения переноса шагающих движителей в новое положение, опирающийся на задаваемую траекторию переноса и соотношение между усилиями, развиваемыми приводами, обеспечивающими устойчивость программного движения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Умнов, Н. В. Теория и методы построения рациональных движителей многоногих шагающих машин : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.18 / Н. В. Умнов. – М., 1981. – 500 с.
2. Петров, Ю. П. Оптимальное управление движением транспортных средств / Ю. П. Петров. – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1969. – 96 с.
3. Вейц, В. Л. Динамика управляемых машинных агрегатов / В. Л. Вейц, М. З. Коловский, А. Е. Кочура. – М.: Наука, 1984. – 352 с.
4. Брискин, Е. С. Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170–176.



5. Малолетов, А. В. Оптимизация структуры, параметров и режимов движения шагающих машин со сдвоенными двигателями : моногр. / А. В. Малолетов, Е. С. Брискин ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – 176 с.

6. Об оценке эффективности шагающих роботов на основе многокритериальной оптимизации их параметров и алгоритмов движения / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов, В. А. Шурыгин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2017. – № 2. – С. 168–176.

7. Брискин, Е. С. Формирование свойств движения механических систем за счет управления реакциями голономных квазиидеальных связей / Е. С. Брискин, В. В. Павловский, В. Е. Павловский, Л. Д. Смирная // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2021. – Т. 6. – № 6. – С. 13–23.

8. Смирная, Л. Д. Групповое движение роботов при учете влияния связей с отклоняющимся аргументом / Л. Д. Смирная, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(263) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 53–57.

9. Лагранж, Ж. Л. Аналитическая механика. Т. I, II / Ж. Л. Лагранж. – М. : Гостехиздат, 1950.

10. Брискин, Е. С. Об управлении движением механических систем с избыточным числом управляющих воздействий / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 3. – С. 48–54.

11. Брискин, Е. С. Об энергетически эффективных режимах движения мобильных роботов с ортогональными шагающими двигателями при преодолении препятствий / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, М. В. Мирошкина // Известия

Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2020. – № 2. – С. 75–82.

12. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными двигателями / Е. С. Брискин, И. П. Вершинина, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 168.

13. Управление движением подводного мобильного робота с якорно-тросовыми двигателями / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов, В. А. Серов, И. С. Пеньшин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 39–45.

14. Брискин, Е. С. Устойчивость поступательного движения шагающей машины с цикловыми двигателями / Е. С. Брискин, А. В. Леонард // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2013. – № 6. – С. 131.

15. Об устойчивости плоского движения мобильных роботов / Е. С. Брискин, К. С. Артемьев, И. П. Вершинина, А. В. Малолетов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(244) / ВолгГТУ. – 2020. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 11–16.

16. Брискин, Е. С. Об устойчивости плоского движения мобильных роботов с шагающими двигателями, работающими в «тянущем» режиме / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, К. С. Артемьев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22. – № 1. – С. 28–34.

17. Меркин, Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения / Д. Р. Меркин. – М.: Наука, 1971. – 312 с.

18. Старжинский, В. М. Достаточные условия устойчивости одной механической системы с одной степенью свободы / В. М. Старжинский // Прикладная математика и механика. – 1952. – Т. 16. – № 3. – С. 369–374.

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-79-85

**В. Ф. Филаретов<sup>1,2</sup>, А. А. Кацурин<sup>2,3</sup>, А. Ю. Коноплин<sup>2,3</sup>**

### **СИСТЕМА СОГЛАСОВАННОГО ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ ДВУМЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ\***

<sup>1</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет

<sup>3</sup>Институт проблем морских технологий ДВО РАН

filaretov@inbox.ru, katsurin@mail.ru, kayur-prim@mail.ru

Рассмотрена система телеуправления манипулятором мобильного робота. Видеокамера, передающая изображение оператору, установлена на другом мобильном роботе и способна изменять пространственную ориентацию. Система позволяет автоматически учитывать текущие ориентации видеокамеры и обоих мобильных роботов.

**Ключевые слова:** мобильный робот, многозвенный манипулятор, телеуправление, система технического зрения, подвижная видеокамера.

**V. F. Filaretov<sup>1,2</sup>, A. A. Katsurin<sup>2,3</sup>, A. Yu. Konoplin<sup>2,3</sup>**

### **THE SYSTEM OF COORDINATED SEMI-AUTOMATIC TELECONTROL OF TWO MOBILE ROBOTS**

<sup>1</sup>Institute of Automation and Control Processes FEB RAS

<sup>2</sup>Far Eastern Federal University

<sup>3</sup>Institute of Marine Technology Problems FEB RAS

The telecontrol system for the manipulator of a mobile robot is considered. The video camera, which transmits the image to the operator, is installed on another mobile robot and is capable of changing the spatial orientation. The system allows to automatically take into account the current orientation of the video camera and both mobile robots.

**Keywords:** mobile robot, multi-link manipulator, telecontrol, vision system, movable video camera.

© Филаретов В. Ф., Кацурин А. А., Коноплин А. Ю., 2022.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант РФФИ 22-29-01156).

## Введение

Создание эффективных мобильных робототехнических комплексов, предназначенных для проведения работ в труднодоступных или опасных для человека местах, по-прежнему остается актуальной и важной задачей современной робототехники. Особенность работ в таких условиях состоит в наличии неопределенности и существенной переменности внешней среды. В результате выполняемые рабочие операции являются достаточно сложными и трудно поддающимися полной автоматизации. Поэтому в таких системах обычно применяется полуавтоматическое управление, когда человек-оператор обеспечивает перемещение рабочего органа (РО) многостепенного манипулятора (ММ) с помощью некоторого задающего устройства (ЗУ), ориентируясь только по изображению рабочего пространства на экране телемонитора [1–3], получаемому с помощью систем технического зрения (СТЗ). Для эффективного наблюдения за рабочей зоной ММ часто требуется устанавливать сразу несколько СТЗ, имеющих различные, произвольно изменяемые во времени пространственные ориентации оптических осей их видеокамер [4–6]. Для быстрого выполнения сложных работ требуется использовать групповое управление несколькими МР, которое в настоящее время уже достаточно хорошо развито [7–10].

Однако при использовании СТЗ с подвижными видеокамерами, которые могут быть установлены сразу на нескольких МР, оператору трудно обеспечивать качественное выполнение сложных технологических операций. Это связано с тем, что в процессе работы он должен постоянно учитывать текущее взаимное расположение ММ и ЗУ, ориентацию оптической оси СТЗ, а также пространственные ориентации всех МР по углам крена, тангажа и рыскания в абсолютной системе координат (АСК). Это снижает производительность и эффективность работы оператора. Кроме того, ЗУ в процессе выполнения операций может оказываться в неудобном для оператора положении, и его нужно будет изменить.

Таким образом, задача создания новых подходов, методов и алгоритмов согласованного управления сразу несколькими МР для эффективного полуавтоматического выполнения точных операций в экстремальных рабочих условиях остается актуальной.

## 1. Постановка задачи

В работе ставится и решается задача создания метода и системы полуавтоматического позиционного телеуправления ММ, установленным на основном МР, с помощью специального ЗУ. При этом используемая система должна позволять оператору работать даже с объектами, находящимися вне поля зрения СТЗ основного МР, за счет формирования изображения рабочего пространства на телемониторе оператора с помощью СТЗ, устанавливаемой на другом – более маневренном МР. Эта СТЗ должна иметь возможность изменять пространственную ориентацию оптической оси своей видеокамеры, вращаясь относительно двух взаимно перпендикулярных осей. При этом синтезируемая система телеуправления должна автоматически учитывать текущую пространственную ориентацию этой оптической оси относительно МР, а также пространственные ориентации оснований обоих МР по углам крена, тангажа и рыскания в АСК, снижая психологическую нагрузку на оператора, повышая производительность и точность выполняемых им операций.

## 2. Описание системы полуавтоматического телеуправления ММ

В качестве основного МР был использован робот KUKA youBot с всенаправленными колесами. Установленный на нем манипулятор имел пять степеней подвижности и двухпальцевый РО (захват). В качестве ЗУ использовалось оборудование PHANTOM Omni (SensAble Technologies, Inc.) с кинематической схемой, имеющей шесть степеней подвижности и отличающейся от кинематической схемы ММ. Однако создаваемый метод телеуправления является универсальным и может быть успешно применен для произвольных кинематических схем как ММ, так и ЗУ.

Общий вид позиционной полуавтоматической системы телеуправления показан на рис. 1. В процессе работы основного МР 1, оснащенного ММ 2 с РО 3 и СТЗ 4, при его нахождении на неровной поверхности могут возникать ситуации, когда СТЗ 4 не видит объект работ 5. В этом случае для наблюдения за объектом 5 может быть использован вспомогательный, более маневренный и, возможно, меньший по габаритам второй МР 6, оснащенный СТЗ 7. Этот малый МР может подходить к объекту 5 с удобного ракурса так, чтобы оператор на экране монитора 8 одновременно видел этот объект и РО 3 манипулятора 2.

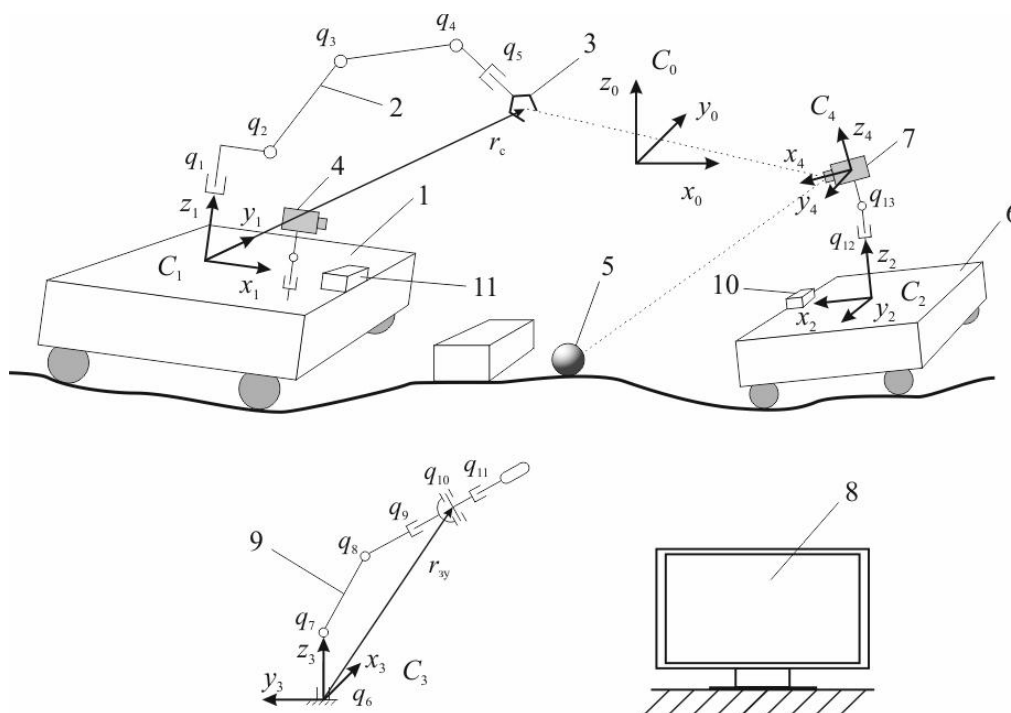


Рис. 1. Система позиционного телеуправления ММ

Оператор задает ориентацию и перемещение РО 3 в системе координат (СК)  $C_1$ , ориентируясь по изображению этого РО на экране телемонитора 8 в СК  $C_3$ . Кинематическая схема ЗУ 9 может отличаться от кинематической схемы ММ 2, но должна обеспечивать все его движения. Для формирования текущего положения РО 3 манипулятора 2 в СК  $C_1$  все координаты рукоятки ЗУ из СК  $C_3$  вначале переводятся в СК  $C_2$ , из нее с помощью навигационной системы 10, оборудованной гироскопами, – в АСК  $C_0$ , и, наконец, с помощью навигационной системы 11, также оборудованной гироскопами, – в СК  $C_1$ . Для снижения психологической нагрузки на оператора СК  $C_3$  и СК  $C_4$  совмещаются. В результате реальное движение рукоятки ЗУ и движение изображения РО 3 на экране монитора воспринимаются оператором как движения в СК  $C_3$ . При этом автоматически учитываются как текущие пространственные ориентации обоих МР в АСК  $C_0$ , так и ориентация СТЗ 7 в СК  $C_2$ .

Предлагаемая система телеуправления ММ может работать в двух чередующихся режимах [5, 6]: стабилизации (вспомогательном) и слежения (рабочем). В режиме стабилизации ММ неподвижно фиксируется в пространстве, а оператор имеет возможность изменять конфигурацию ЗУ, а также ориентацию оптической оси СТЗ 7. В момент перехода к режиму слежения

обеспечивается согласование текущего положения ММ с новым положением и ориентацией ЗУ. В дальнейшем при выполнении рабочих операций ММ выполняются любые движения, определяемые ЗУ, и поддерживается взаимная ориентация рукоятки ЗУ и изображения РО ММ на экране телемонитора 8 при любой ориентации СТЗ 7.

Для реализации рассмотренного способа телеуправления ММ был создан специальный алгоритм работы вычислительной системы, обеспечивающей одновременное формирование задающих воздействий на приводы всех степеней подвижности ММ, который описан ниже.

### 3. Алгоритм работы предложенной системы телеуправления ММ

При описании данного алгоритма используются матрицы однородных преобразований  $T_j^i \in T^{4 \times 4}$ , включающие элементарные повороты и сдвиги (эти матрицы преобразуют вектор, заданный в повернутой СК  $C_j$ , в вектор, заданный в неподвижной СК  $C_i$  [11]).

*Этап 1.* На этом этапе выполняется решение прямой задачи кинематики для ММ и ЗУ, которая заключается в определении положения и ориентации РО ММ и ЗУ в пространстве с использованием текущих значений всех обобщенных координат. Для этого вначале соответствующими датчиками, встроенными во

все степени подвижности ММ и ЗУ, измеряются указанные значения всех обобщенных координат  $q_1$ - $q_{11}$  (рис. 1). Затем, учитывая известные геометрические параметры (размеры и кинематические схемы) ММ и ЗУ, рассчитываются начальные значения векторов  $r_{c_0}$  и  $r_{з_0}$ . Решения этих задач являются типовыми [11], не вызывают затруднений и поэтому в статье опускаются.

*Этап 2.* Определение матрицы  $T_3^1$ , связывающей СК  $C_3$  и  $C_1$ . Ранее уже указывалось, что для оператора, наблюдающего за движением ММ по изображению рабочей зоны на экране телемонитора, СК  $C_3$  и  $C_4$  всегда совпадают, поскольку это изображение всегда перпендикулярно оси  $x_4$ , а экран телемонитора в СК  $C_3$  неподвижен. Следовательно, связь между СК  $C_3$  и  $C_1$  (или, что то же самое, между СК  $C_4$  и  $C_1$ ) зависит от текущей пространственной ориентации оптической оси СТЗ 7 и ориентаций обоих

$$T_4^2 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & 0 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & -s_{12} & c_{12}s_{13} & 0 \\ s_{12}c_{13} & c_{12} & s_{12}s_{13} & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $c_{12}, s_{12}, c_{13}, s_{13}$  –  $\cos(q_{12}), \sin(q_{12}), \cos(q_{13}), \sin(q_{13})$ , соответственно.

Затем с помощью встроенных навигационных систем 10 и 11, соответственно, определяются углы крена, тангажа и рыскания основного 1 и вспомогательного 6 МР –  $\theta_{10}, \theta_{20}, \psi_{10}, \psi_{20}, \varphi_{10}, \varphi_{20}$  относительно осей АСК (углы поворотов СК  $C_1$  и  $C_2$  вокруг осей  $x_1$  и  $x_2, y_1$  и  $y_2, z_1$  и  $z_2$ , соответственно). Особенности построения и функционирования универсальных информационно-управляющих систем МР, включающих навигационные системы, которые определяют текущие положения и ориентации МР в АСК на основе данных, поступающих от бортовых датчиков различных типов, детально описаны в ра-

боте [12] и для сокращения объема статьи также опускаются.

МР в АСК (рис. 1). Матрица  $T_3^1 = T_4^1$  обеспечивает последовательное преобразование вектора, заданного в СК  $C_4$ , сначала в СК  $C_2$ , затем в АСК  $C_0$  и, наконец, – в СК  $C_1$ . Таким образом, можно записать  $T_3^1 = T_4^1 = T_0^1 T_2^0 T_4^2$ . Найдем все указанные матрицы.

Поскольку оптическая ось видеокамеры 7 МР 2 может произвольно изменять свою пространственную ориентацию с помощью двух ее степеней подвижности  $q_{12}$  и  $q_{13}$  (рис. 1), то для получения матрицы  $T_4^2$ , связывающей СК  $C_4$  с СК  $C_2$ , можно использовать преобразования, подробно описанные в работах [4–6]. Эта матрица формируется путем последовательного перемножения двух однородных матриц, реализующих поворот СК  $C_4$  на угол  $q_{12}$  вокруг оси  $z_2$  и поворот на угол  $q_{13}$  вокруг уже повернутой оси  $y_4$ . В итоге искомая матрица  $T_4^2$  принимает вид:

боте [12] и для сокращения объема статьи также опускаются.

Матрица  $T_2^0$  реализует последовательность элементарных поворотов. Оси, относительно которых отсчитываются углы соответствующих поворотов СК  $C_2$ , и последовательность этих поворотов должны выбираться такими, чтобы получаемые при этом углы  $\theta_{20}, \psi_{20}, \varphi_{20}$  соответствовали углам, измеряемым гироскопами навигационной системы. Это условие выполняется, когда вначале осуществляется поворот СК  $C_2$  на угол рыскания  $\varphi_{20}$  вокруг оси  $z_2$ , затем поворот на угол тангажа  $\psi_{20}$  вокруг уже повернутой оси  $y_2$  и после этого – поворот на угол крена  $\theta_{20}$  вокруг повернутой оси  $x_2$ . В результате матрица  $T_2^0$  принимает вид:

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c_{\phi_2} & -s_{\phi_2} & 0 & 0 \\ s_{\phi_2} & c_{\phi_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{\psi_2} & 0 & s_{\psi_2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_{\psi_2} & 0 & c_{\psi_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\theta_2} & -s_{\theta_2} & 0 \\ 0 & s_{\theta_2} & c_{\theta_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\phi_2}c_{\psi_2} & c_{\phi_2}s_{\psi_2}s_{\theta_2} - s_{\phi_2}c_{\theta_2} & c_{\phi_2}s_{\psi_2}c_{\theta_2} + s_{\phi_2}s_{\theta_2} & 0 \\ s_{\phi_2}c_{\psi_2} & s_{\phi_2}s_{\psi_2}s_{\theta_2} + c_{\phi_2}c_{\theta_2} & s_{\phi_2}s_{\psi_2}c_{\theta_2} - c_{\phi_2}s_{\theta_2} & 0 \\ -s_{\psi_2} & c_{\psi_2}s_{\theta_2} & c_{\psi_2}c_{\theta_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $c_{\theta_2}, s_{\theta_2}, c_{\psi_2}, s_{\psi_2}, c_{\varphi_2}, s_{\varphi_2} - c(\theta_2), \sin(\theta_2), \cos(\psi_2), \sin(\psi_2), \cos(\varphi_2), \sin(\varphi_2)$ , соответственно.

Аналогично можно построить матрицу однородных преобразований  $T_0^1$ . Однако для этого

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_{\phi_1}c_{\psi_1} & c_{\phi_1}s_{\psi_1}s_{\theta_1} - s_{\phi_1}c_{\theta_1} & c_{\phi_1}s_{\psi_1}c_{\theta_1} + s_{\phi_1}s_{\theta_1} & 0 \\ s_{\phi_1}c_{\psi_1} & s_{\phi_1}s_{\psi_1}s_{\theta_1} + c_{\phi_1}c_{\theta_1} & s_{\phi_1}s_{\psi_1}c_{\theta_1} - c_{\phi_1}s_{\theta_1} & 0 \\ -s_{\psi_1} & c_{\psi_1}s_{\theta_1} & c_{\psi_1}c_{\theta_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $c_{\theta_1}, s_{\theta_1}, c_{\psi_1}, s_{\psi_1}, c_{\phi_1}, s_{\phi_1} - \cos(\theta_1), \sin(\theta_1), \cos(\psi_1), \sin(\psi_1), \cos(\phi_1), \sin(\phi_1)$ , соответственно;  $R$  – матрица сложного поворота (размерностью  $3 \times 3$ );  $o = [0 \ 0 \ 0]^T$  – нулевой вектор-столбец размерностью  $3 \times 1$ .

Искомую матрицу  $T_0^1$  несложно получить, выполнив обратное преобразование матрицы

$$T_1^0 \text{ [11]}. \text{ Тогда } T_0^1 = (T_1^0)^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Вычисления на этапах 1 и 2 алгоритма выполняются однократно.

*Этап 3.* На этом этапе начинается режим слежения, и определяется новое положение характерной точки РО ММ. Сначала измеряются текущие значения углов ЗУ  $q_6 - q_{11}$  (рис. 1), а по ним, решая прямую задачу кинематики, рассчитываются текущие значения вектора  $r_{zy}$  в СК  $C_3$ . После этого вычисляется вектор отклонения текущего положения ЗУ от начального  $r_{zy0}$  по формуле  $\Delta r_{zy} = r_{zy} - r_{zy0}$ . Затем данный вектор преобразуется из СК  $C_3$  в СК  $C_1$ . Далее, зная вектор исходного положения характерной точки ММ  $r_{c0}$  и вектор  $\Delta r_{zy}$ , вычисляется ее новое положение с помощью выражения:  $r_c = T_3^1 \Delta r_{zy} + r_{c0}$ .

*Этап 4.* На этом этапе решается обратная задача кинематики ММ, которая заключается в вычислении текущих значений обобщенных координат его переносных и ориентирующих степеней подвижности  $q_1 - q_5$  с помощью полученных на предыдущем этапе значений элементов вектора  $r_c$ . Решение этой задачи основано на применении известного математического аппарата обратных тригонометрических функций с учетом геометрических параметров ММ [11] и также является типовым, поэтому в ста-

вначале удобно построить матрицу  $T_1^0$ , переводящую векторы из СК  $C_1$  в АСК  $C_0$ , учитывая, что  $C_1$  также повернута относительно  $C_0$  на углы  $\theta_{10}, \psi_{10}, \varphi_{10}$  вокруг осей  $x_1, y_1$  и  $z_1$ , соответственно. В результате матрица  $T_1^0$  принимает вид:

тье не рассматривается. Полученные обобщенные координаты являются задающими воздействиями для соответствующих следящих приводов ММ и подаются на входы этих приводов.

*Этап 5.* Если в текущий момент времени задан режим слежения, то происходит переход в начало цикла (на этап 3). Если задан режим стабилизации, то происходит переход к этому режиму.

#### 4. Моделирование и исследование работы системы

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма полуавтоматического телеуправления ММ было проведено моделирование работы рассматриваемой системы. В процессе работы оператор, видя изображение РО и объекта работ на экране телемонитора (СК  $C_3$ ), начинает перемещать рукоятку ЗУ в СК  $C_3$ , обеспечивая переход РО к объекту. В соответствии с предложенным в статье подходом, изображение РО на экране должно перемещаться параллельно перемещению рукоятки ЗУ при любой ориентации СТЗ и МР.

В процессе моделирования предполагалось, что оба МР находятся на ровной горизонтальной поверхности, а их ориентации совпадают с ориентациями на рис. 1. При этом  $\theta_{10} = \theta_{20} = \psi_{10} = \psi_{20} = \varphi_{10} = 0$ ;  $\varphi_{20} = \pi$ . В начальный момент времени заданы положения РО [15, 5, 20] и объекта работ [29, -5, 5] в  $C_1$ , а также ЗУ [10, -10, 25] в  $C_3$ .

Результаты моделирования работы системы представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 цифрой 1 обозначена траектория движения конца вектора  $r_{zy}$  в СК  $C_3$  при значениях углов поворота СТЗ  $q_{12} = 0$  и  $q_{13} = 0$ . При этом выполняется перемещение рукоятки ЗУ из начальной точки А в точку С через промежуточную точку В для обхода препятствия. На этом же рисунке пока-

заны проекции данной траектории на соответствующие горизонтальную и вертикальные плоскости. Указанное перемещение ЗУ приводит к соответствующему перемещению РО ММ из начальной точки  $A$  в точку  $C$  через точку  $B$  по траектории движения конца вектора  $r_c$  в СК  $C_1$  (ломаная  $1$  на рис. 3 с ее проекциями на соответствующие горизонтальную и вертикальные

плоскости). Из рис. 2 и 3 видно, что при заданной исходной ориентации МР оси  $x_1$  и  $y_1$  СК  $C_1$  направлены в противоположную сторону по отношению к осям  $x_2$  ( $x_4$ ) и  $y_2$  ( $y_4$ ) СК  $C_2$  и  $C_4$ . В результате движения ЗУ и РО в своих СК выполняются в противоположных направлениях, но на экране монитора для оператора движения ЗУ и РО имеют одно направление и параллельны.

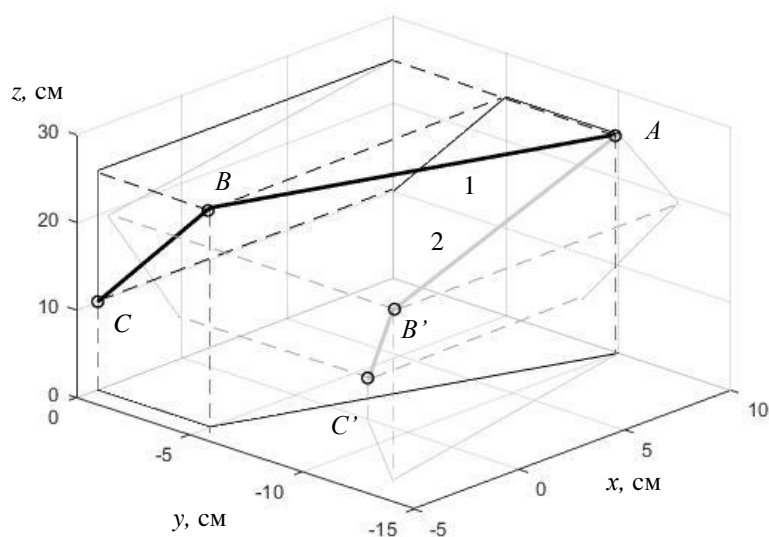


Рис. 2. Траектории движений конца вектора  $r_{zy}$  ЗУ в СК  $C_3$

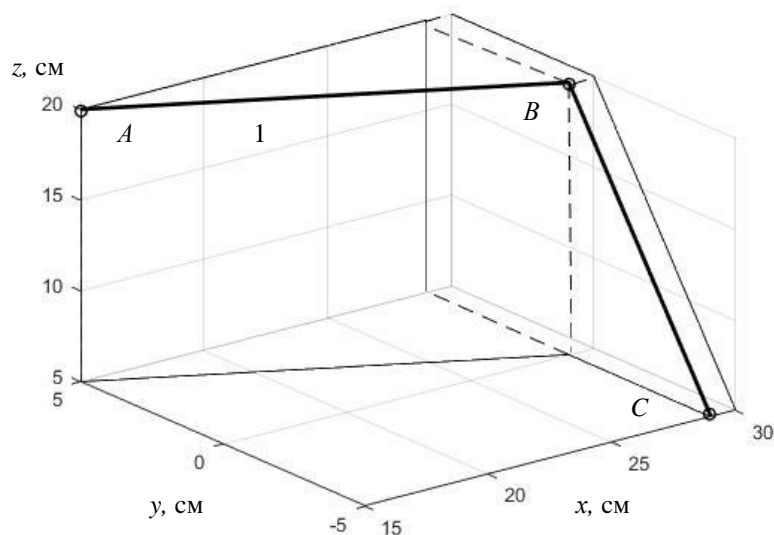


Рис. 3. Траектории движений конца вектора  $r_c$  ММ в СК  $C_1$

Далее было выполнено моделирование работы системы при повороте СТЗ на углы  $q_{12} = \pi/6$ ,  $q_{13} = \pi/8$ . При этом ракурс изображения рабочей зоны и координаты РО и объекта в СК  $C_4$  на экране монитора изменяются, но

положения ЗУ и РО в своих СК в начальный момент времени остаются прежними. В результате для захвата объекта оператор перемещает ЗУ в СК  $C_3$  из точки  $A$  через точку  $B'$  в точку  $C'$  уже по другой траектории 2 (рис. 2). При этом

в СК  $C_1$  траектория перемещения РО ММ из точки  $A$  в точку  $C$  через точку  $B$  (ломаная  $I$  на рис. 3) остается неизменной.

Аналогичные результаты получаются и при изменениях пространственных ориентаций одного или обоих МР в АСК. При этом траектории движения рукоятки ЗУ в СК  $C_3$  будут отличаться при одинаковых движениях РО ММ в СК  $C_1$ .

Таким образом, результаты выполненного моделирования полностью подтвердили работоспособность и эффективность предложенного метода синтеза системы позиционного полуавтоматического телеуправления ММ и алгоритма работы созданной вычислительной системы.

#### Заключение

В статье рассмотрен предложенный алгоритм работы системы позиционного полуавтоматического телеуправления ММ, установленным на одном из МР. Эта система может быть использована в робототехнических комплексах, предназначенных для дистанционного выполнения работ в труднодоступных и опасных для человека местах. Она позволяет улучшить эксплуатационные характеристики и расширить функциональные возможности указанного комплекса, обеспечивая непрерывное получение визуальной информации об объекте работ с нескольких ракурсов, даже когда этот объект не виден СТЗ основного МР, а наблюдается СТЗ вспомогательного МР. Это значительно увеличивает эффективность использования МР в экстремальных условиях. Предложенный алгоритм телеуправления ММ позволяет автоматически учитывать пространственные ориентации оптических осей всех применяемых СТЗ, а также пространственные ориентации оснований обоих МР по углам крена, тангажа и рыскания в АСК. Результаты выполненного математического моделирования полностью подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенного подхода к созданию системы телеуправления ММ. Ее техническая реализация не вызывает затруднений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Andreev, V. P. Operation Environment of Mobile Robots with Supervision Control / V. P. Andreev, V. E. Pryanichnikov // Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium. Vienna, Austria, 2011. – Volume 22, No. 1. – Pp. 0021–0022.
2. Design of Coordination System for Composite Mobile Robot Platform Oriented to Nuclear Fusion Vessel / Q. Zhang, B. Song, B. Cai, Y. Sun // Journal of Fusion Energy. – 2021. – 40(2). – Paper 22.
3. A teleoperation interface for loco-manipulation control of mobile collaborative robotic assistant / Y. Wu, P. Balatti, M. Lorenzini, F. Zhao, W. Kim, A. Ajoudani // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – 4(4). – Pp. 3593–3600.
4. Филаретов, В. Ф. Метод полуавтоматического комбинированного управления манипулятором с помощью подвижной телекамеры / В. Ф. Филаретов, А. А. Кацурин, Ю. А. Пугачев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 2. – С. 38–45.
5. Филаретов, В. Ф. Метод полуавтоматического позиционного управления манипулятором с помощью телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси / В. Ф. Филаретов, А. А. Кацурин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 9. – С. 15–22.
6. Филаретов, В. Ф. Система телеуправления многозвонным манипулятором, установленным на мобильном роботе / В. Ф. Филаретов, А. А. Кацурин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – № 12. – С. 40–48.
7. Distributed position-force control for cooperative transportation with multiple mobile manipulators / P. Xu, J. Zheng, J. Zhang, K. Zhang, Y. Cui, Q. Tang // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2021. – Vol. 12690 LNCS. – Pp. 111–118.
8. Multi-robot search for a moving target: Integrating world modeling, task assignment and context / F. Riccio, E. Borzi, G. Gemignani, D. Nardi // Proc. of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016. – Pp. 1879–1886.
9. Система группового транспортного управления мобильными наземными роботами на различных грунтах / В. Г. Градецкий, И. Л. Ермолов, М. М. Князьков, Б. С. Лапин, Е. А. Семенов, С. А. Собольников, А. Н. Суханов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 61–71.
10. Меркулов, В. И. Синтез согласованного управления группой объектов / В. И. Меркулов // Динамика сложных систем – XXI век. – 2016. – Т. 10, № 2. – С. 23–27.
11. Зенкевич, С. Л. Основы управления манипуляционными роботами / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 480 с.
12. Филаретов, В. Ф. Информационно-управляющая система для мобильных роботов / В. Ф. Филаретов, Д. А. Юхимец, Э. Ш. Мурсалимов // Автометрия. – 2015. – Т. 51, № 5. – С. 92–100.

УДК 007.52 + 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2022-9-268-86-93

*А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин***О ПЕРЕМЕЩЕНИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА  
ПО ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ\***

Волгоградский государственный технический университет

Aram-081097@mail.ru, dtm@vstu.ru

Представлена математическая модель робототехнической системы с одноопорным механизмом, предназначенной для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям; выполнен статический расчет предложенной системы; подобраны ее геометрические параметры.

*Ключевые слова:* мобильные робототехнические средства, перемещение, математическая модель, произвольно ориентированные поверхности, одноопорный механизм.

*A. A. Khachatryan, E. S. Briskin***MATHEMATICAL MODEL OF A ROBOTIC SYSTEM WITH A SINGLE  
SUPPORT MOVING ALONG ARBITRARILY ORIENTED SURFACES**

Volgograd State Technical University

The paper presents a mathematical model of a robotic system with a single-support mechanism designed to move along arbitrarily oriented surfaces, a static calculation of the proposed system is performed, its geometric parameters are selected.

*Keywords:* mobile robotics, displacement, mathematical model, arbitrarily oriented surfaces, single-support mechanism.

**Введение**

Важной и актуальной является проблема передвижения робототехнических систем по произвольно ориентированным поверхностям. Такие аппараты могли бы выполнять целый ряд работ: очистка и обработка различных труднодоступных поверхностей (рис. 1), исследование крупногабаритных сооружений на наличие конструктивных дефектов и др.

Под произвольно ориентированными поверхностями понимается относительно ровная поверхность, расположенная под углом от 0 до 90° к горизонтали.

Известно достаточно большое количество ро-

бототехнических систем, предназначенных для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям [1–10]. Анализ их достоинств и недостатков позволил за основу выбрать робот, опирающийся на обрабатываемую поверхность за счет прижатия к ней манипулятором, выполненным на основе трипода [11, 12]. Однако вместо трипода можно использовать одноопорный механизм, в котором за счет работы одного линейного привода и осуществляется реализация усилия «прижатия» робота к обрабатываемой поверхности. Такой одноопорный механизм подобен однотросовому механизму робота, перемещающегося по вертикальной поверхности [13].



Рис. 1. Очистка вертикальных стеклянных поверхностей людьми

© Хачатрян А. А., Брискин Е. С., 2022.

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



**Постановка задачи**

Рассматривается плоская задача о равновесии робототехнической системы, использующей в качестве механизма «прижатия» одноопорный манипулятор с одним линейным приводом. Ставится задача определения массово-геометрических параметров, линейных и угловых размеров всей робототехнической системы, обеспечивающих отсутствие изгибных усилий, действующих на механизм «прижатия» и его линейный привод.

**Расчетная схема робототехнической системы с одной опорой**

Расчетная схема рассматриваемой робототехнической системы с одной опорой представлена на рис. 2. Рассматривается равновесие робототехнической системы, которая представляет собой робот 1, перемещающийся по произвольно ориентированной поверхности 2 за счет опоры на горизонтальную плоскость 3 посредством одноопорного механизма 4, представляющего собой линейный привод, закрепленный шарнирно на горизонтальной плоскости.

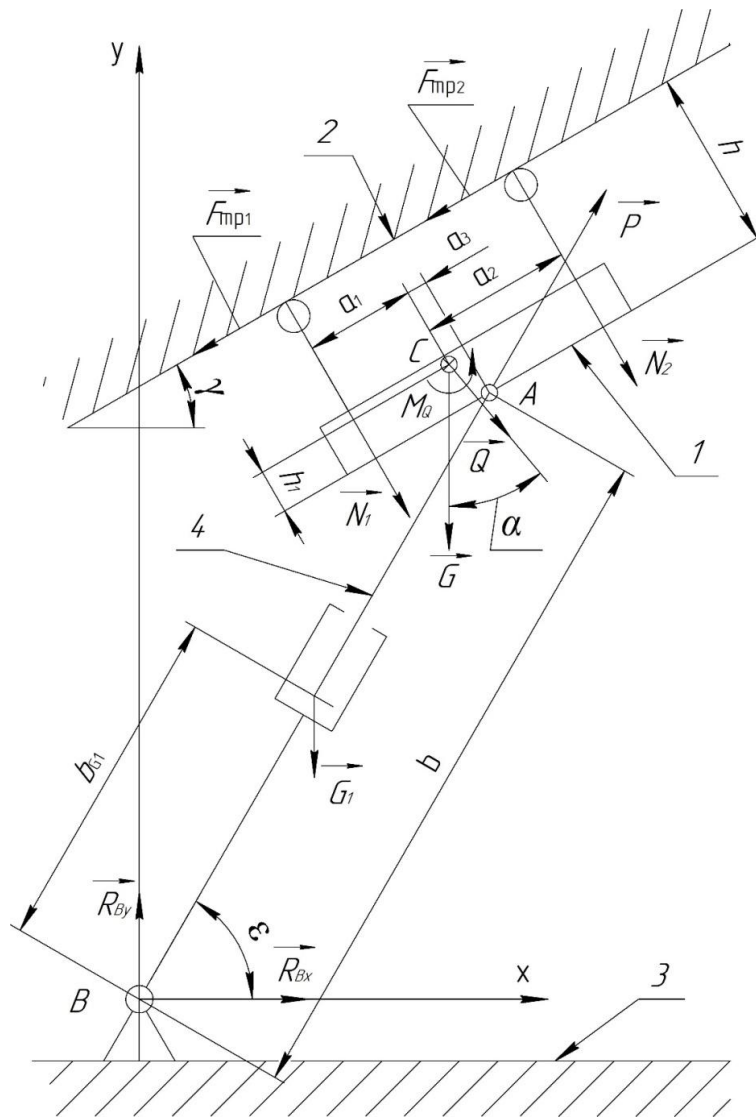


Рис. 2. Расчетная схема робота с одноопорным механизмом

На рис. 2 использованы следующие обозначения:  $\epsilon$  – угол наклона одноопорного механизма к горизонтали;  $\gamma$  – угол наклона произвольно ориентированной поверхности к гори-

зонтали;  $a_1, a_2$  – расстояния от центра масс робота до колесных (или другого типа) опор;  $a_3$  – расстояние от центра масс робота до шарнира A;  $h$  – высота робота;  $h_1$  – расстояние от верши-

ны робота до его центра масс;  $b$  – длина линейного привода;  $b_{G1}$  – расстояние от основания линейного привода до его центра масс;  $P$  – усилие линейного привода;  $Q, M_Q$  – усилие и момент, действующие на робот со стороны инструмента;  $N_1, N_2$  – реакции опор;  $F_{тр1}, F_{тр2}$  – силы трения;  $G$  – сила тяжести мобильного робота;  $G_1$  – сила тяжести линейного привода;  $R_{Bx}, R_{By}$  – реакции в шарнире  $B$ .

### Метод решения

Для решения поставленной задачи робототехническая система расчленяется на две части: непосредственно робот, как мобильная платформа (рис. 3), и одноопорный механизм «прижатия» (рис. 4). Для каждой части составляются уравнения равновесия.

На рис. 3 и 4  $P_1$  и  $P_2$  – реакции в шарнире  $A$ .

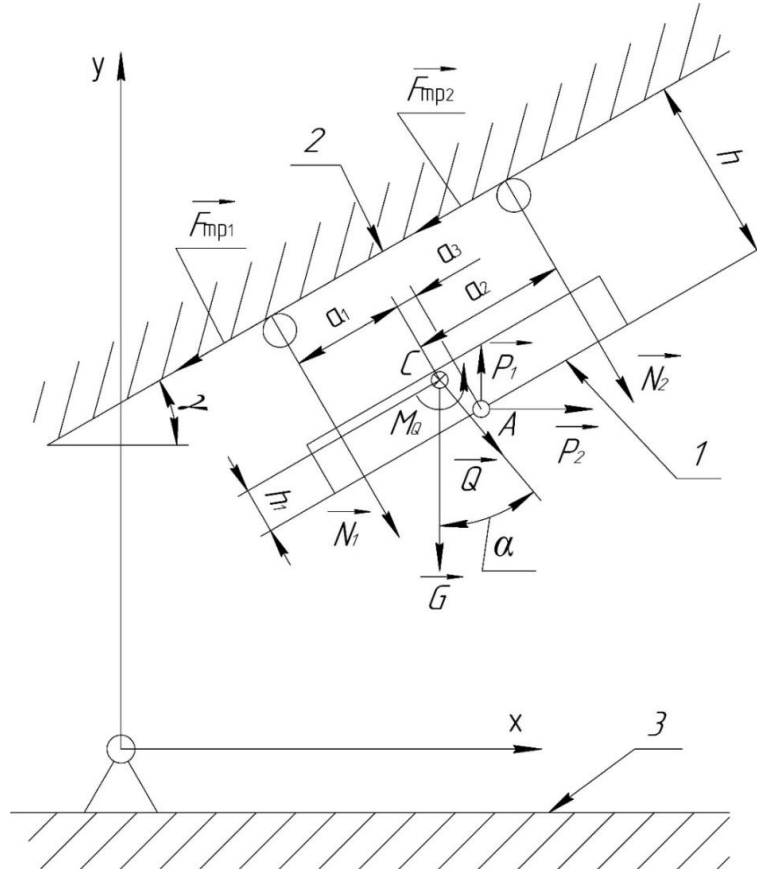


Рис. 3. Схема робота на произвольно ориентированной поверхности

Для робота:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \\ \sum F_y = 0, \\ \sum M_A = 0, \\ -F_{тр1} \cos \gamma - F_{тр2} \cos \gamma + N_1 \sin \gamma + N_2 \sin \gamma + P_2 + Q \sin \alpha = 0, \\ -F_{тр1} \sin \gamma - F_{тр2} \sin \gamma - N_1 \cos \gamma - N_2 \cos \gamma - G + P_1 - Q \cos \alpha = 0, \\ F_{тр1} h + F_{тр2} h + N_1 (a_1 + a_3) - N_2 a_2 + G \sin \gamma h_1 + G \cos \gamma a_3 + M_Q = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{cases} F_{тр1} = \mu_1 N_1, \\ F_{тр2} = \mu_2 N_2, \end{cases} \begin{cases} 0 \leq \mu_1 \leq f, \\ 0 \leq \mu_2 \leq f. \end{cases} \quad (2)$$

В критической ситуации, когда может начаться движение  $\mu_1 = \mu_2 = f$ , где  $f$  – коэффициент трения между колесами робота и произвольно ориентированной поверхностью.

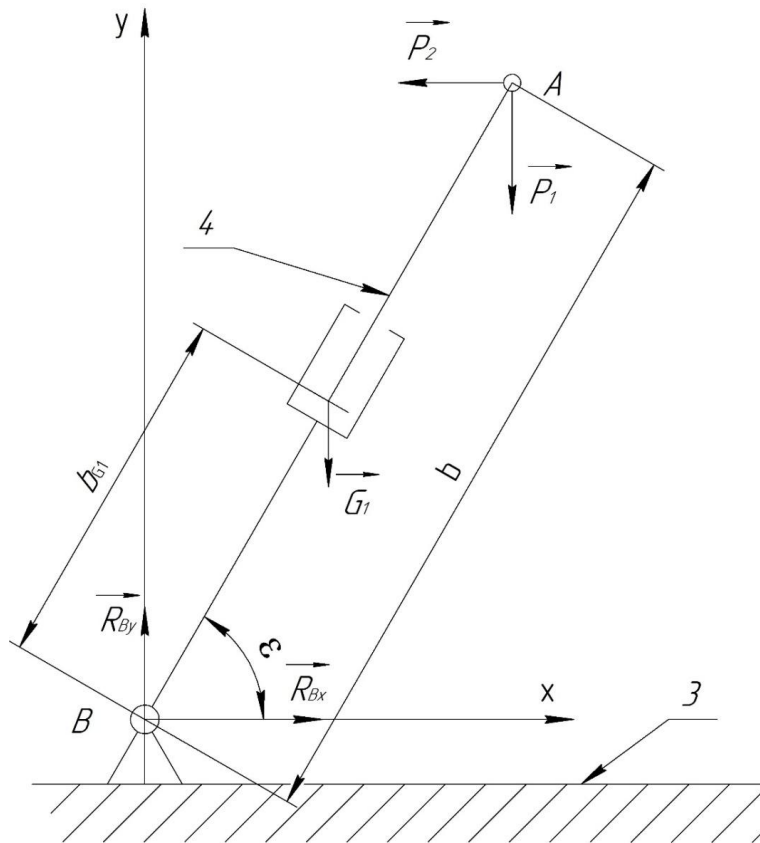


Рис. 4. Схема одноопорного механизма робототехнической системы

Для одноопорного механизма прижатия, у которого опора  $B$  закреплена на горизонтальной плоскости:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \\ \sum F_y = 0, \\ \sum M_A = 0, \end{cases} \begin{cases} R_{Bx} - P_2 = 0, \\ R_{By} - G_1 - P_1 = 0, \\ R_{Bx} b \sin \varepsilon - R_{By} b \cos \varepsilon + G_1 (b - b_{G1}) \cos \gamma = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Из уравнений (1), (2), (3) следует:

$$\begin{aligned} R_{Bx} &= \frac{CK + b \cos(\varepsilon)(CD - AQ \sin(\alpha))}{Ab \cos(\varepsilon) - Cb \sin(\varepsilon)}, \\ R_{By} &= \frac{AK + CD b \sin(\varepsilon) - A Q b \sin(\alpha) \sin(\varepsilon)}{Ab \cos(\varepsilon) - Cb \sin(\varepsilon)}, \\ N_1 &= \frac{KL + DL b \cos(\varepsilon) - AZ b \cos(\varepsilon) + CZ b \sin(\varepsilon) - L Q b \sin(\alpha) \sin(\varepsilon)}{b(A \cos(\varepsilon) - C \sin(\varepsilon))(F - L)}, \\ N_2 &= \frac{FK + DF b \cos(\varepsilon) - AZ b \cos(\varepsilon) + CZ b \sin(\varepsilon) - F Q b \sin(\alpha) \sin(\varepsilon)}{b(C \sin(\varepsilon) - A \cos(\varepsilon))(F - L)}, \\ P_1 &= \frac{AK + CD b \sin(\varepsilon) - A Q b \sin(\alpha) \sin(\varepsilon)}{Ab \cos(\varepsilon) - Cb \sin(\varepsilon)} - G_1, \\ P_2 &= \frac{CK + b \cos(\varepsilon)(CD - AQ \sin(\alpha))}{Ab \cos(\varepsilon) - Cb \sin(\varepsilon)}. \end{aligned} \quad (4)$$

В (4) переменными  $A, C, D, F, K, L, Z$  обозначены следующие выражения:

$$\begin{aligned} A &= -f \sin(\gamma) - \cos(\gamma), \\ C &= -f \cos(\gamma) + \sin(\gamma), \\ D &= -G - G_1 - Q \cos(\alpha), \\ F &= fh + a_1 + a_3, \\ K &= G_1(b - b_{G1}) \cos(\gamma), \\ L &= -fh - a_2, \\ Z &= G \sin(\gamma)h_1 + G \cos(\gamma)a_3 + M_Q. \end{aligned} \quad (5)$$

Используя выражения (4), (5), определяют такие геометрические параметры робототехнической системы, при которых выполняются следующие условия:

$$\frac{P_1}{P_2} = \operatorname{tg}(\varepsilon); \quad (6)$$

$$\sqrt{P_1^2 + P_2^2} \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$\sqrt{N_1^2 + N_2^2} \leq [N]. \quad (8)$$

Условие (6) обеспечивает отсутствие изгибающего момента в одноопорном механизме робота, условие (7) – минимальное, достаточное усилие линейного привода для обеспечения необходимого прижатия робота и, соответственно, его работоспособности. Неравенство (8) предотвращает повреждение произвольно направленной поверхности опорами мобильной платформы; здесь  $[N]$  – допустимое усилие, при

превышении которого целостность поверхности разрушается.

Выражая из уравнения (6) угол  $\varepsilon$ , получаем:

$$\varepsilon = \left[ \begin{array}{c} \pm \arccos\left(\frac{K}{bG_1}\right) \\ -2\operatorname{arctg}\left(\frac{C \pm \sqrt{A^2 + C^2}}{A}\right) \end{array} \right]. \quad (9)$$

#### Имитационное моделирование

Начальные данные для имитационного моделирования приведены в таблице ниже.

Начальные данные  
для имитационного моделирования

$a_1 = 0,4$ м	$h = 0,5$ м	$b = 3$ м	$G = 100$ Н	$\alpha = 40^\circ$
$a_2 = 0,6$ м	$h_1 = 0,1$ м	$b_{G1} = 1$ м	$G_1 = 80$ Н	$\gamma = -50^\circ$
$a_3 = 0,1$ м	$f = 0,8$	$Q = 100$ Н	$M_Q = 30$ Нм	

Отрицательное значение угла  $\gamma$  означает его построение от горизонтали по часовой стрелке. Для указанных начальных данных был подобран угол наклона линейного привода  $\varepsilon = 64,6^\circ$ , при котором выполняются условия (6), (7). При этом значение данного угла зависит от угла наклона произвольно ориентированной поверхности к горизонтали  $\gamma$  и геометрических размеров линейного привода  $b$  и  $b_{G1}$ . Графики зависимостей приведены на рис. 5 и 6.

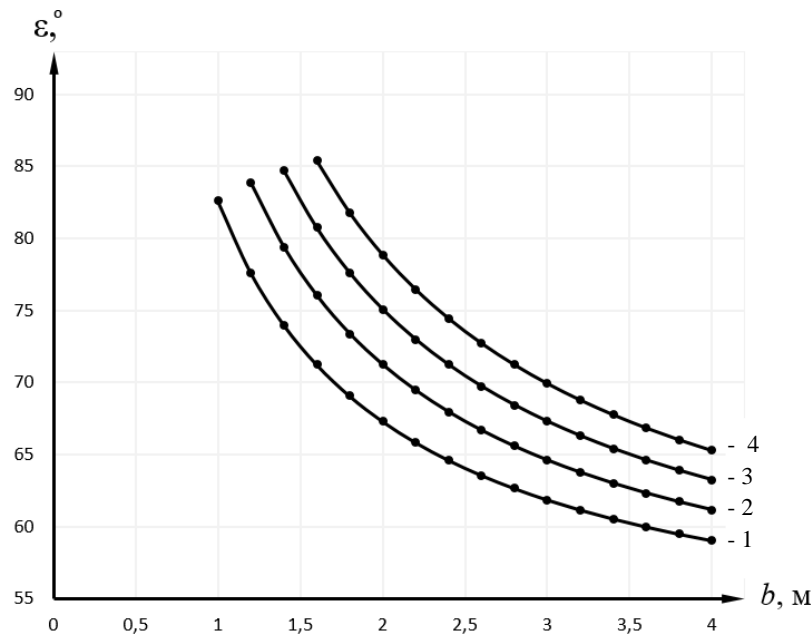


Рис. 5. График зависимости  $\varepsilon$  от  $b$

На рис. 5 показана зависимость длины линейного привода  $b$  от угла его наклона к гори-

зонту  $\varepsilon$  при значениях: 1 –  $b_{G1} = 0,8$  м; 2 –  $b_{G1} = 1$  м; 3 –  $b_{G1} = 1,2$  м; 4 –  $b_{G1} = 1,4$  м.

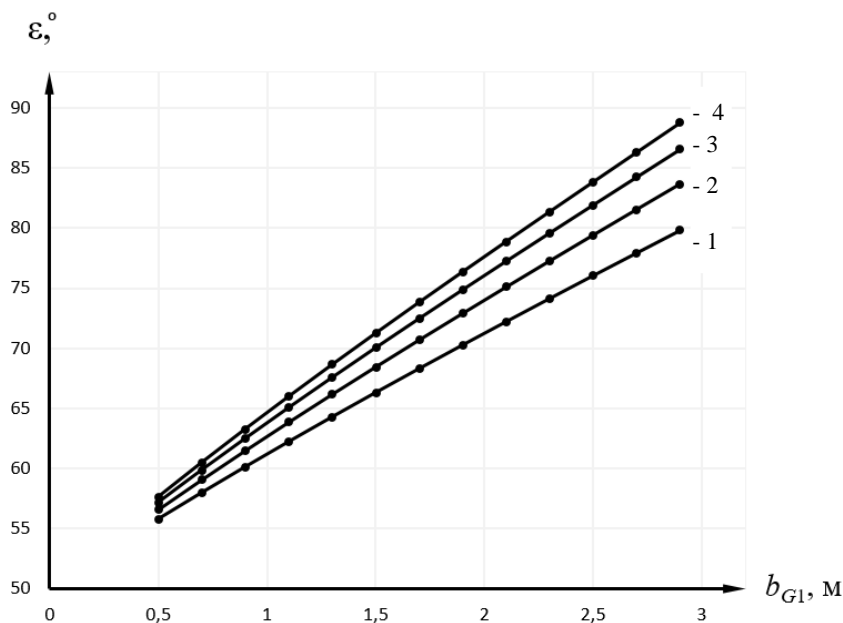


Рис. 6. График зависимости  $\epsilon$  от  $b_{G1}$

Зависимость расстояния от основания линейного привода до его центра масс  $b_{G1}$  (рис. 6) от угла его наклона к горизонту  $\epsilon$  построена при следующих значениях длины линейного привода: 1 –  $b = 4$  м; 2 –  $b = 3,5$  м; 3 –  $b = 3,2$  м; 4 –  $b = 3$  м. При приближении значений  $b$  к значениям  $b_{G1}$  и наоборот, угол наклона линейного привода  $\epsilon$  резко возрастает и при  $b = b_{G1}$ :  $\epsilon = 90^\circ$ .

На рис. 7 представлен график зависимости усилия линейного привода  $P$  от коэффициента трения  $f$ , где усилие  $P$  выражается формулой:

$$P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}, \quad (10)$$

а диапазон значений коэффициента трения  $f$  принят от 0,5 для соединения резина-алюминий до 1,15 для соединения резина-резина, при этом выполняются условия (6), (7) [14].

График зависимости усилия линейного привода  $P$  от коэффициента трения  $f$  получен при следующих значениях геометрических размеров линейного привода: 1 –  $b = 2$  м,  $b_{G1} = 1$  м; 2 –  $b = 2,5$  м,  $b_{G1} = 1$  м; 3 –  $b = 3$  м,  $b_{G1} = 1$  м; 4 –  $b = 2$  м,  $b_{G1} = 0,5$  м; 5 –  $b = 2,5$  м,  $b_{G1} = 0,5$  м; 6 –  $b = 3$  м,  $b_{G1} = 0,5$  м.

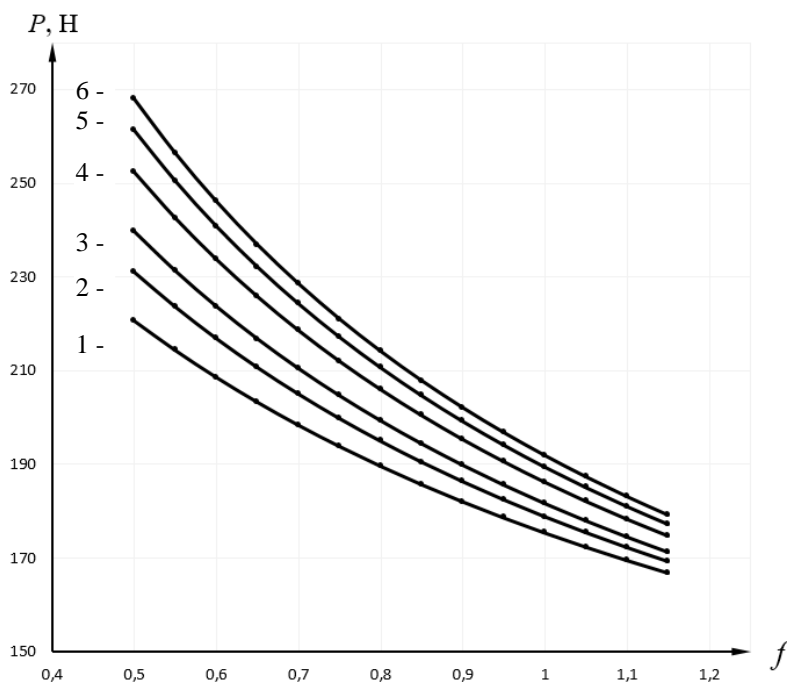


Рис. 7. График зависимости усилия линейного привода  $P$  от коэффициента трения  $f$

Представленный график показывает, что большему расстоянию от основания линейного привода до его центра масс  $b_{G1}$  и меньшему значению его длины  $b$  соответствует меньшее значение усилия линейного привода  $P$ . Целесообразным будет выбор больших значений  $b_{G1}$  для одноопорного механизма.

Увеличение коэффициента трения между колесами мобильной платформы и произвольно направленной поверхностью ведет к уменьшению усилия линейного привода  $P$ , что, в свою очередь, приводит к снижению значений реакций опор  $N_1, N_2$  (рис. 8). Условия (1)–(6) для графиков на рис. 7, 8 идентичны.

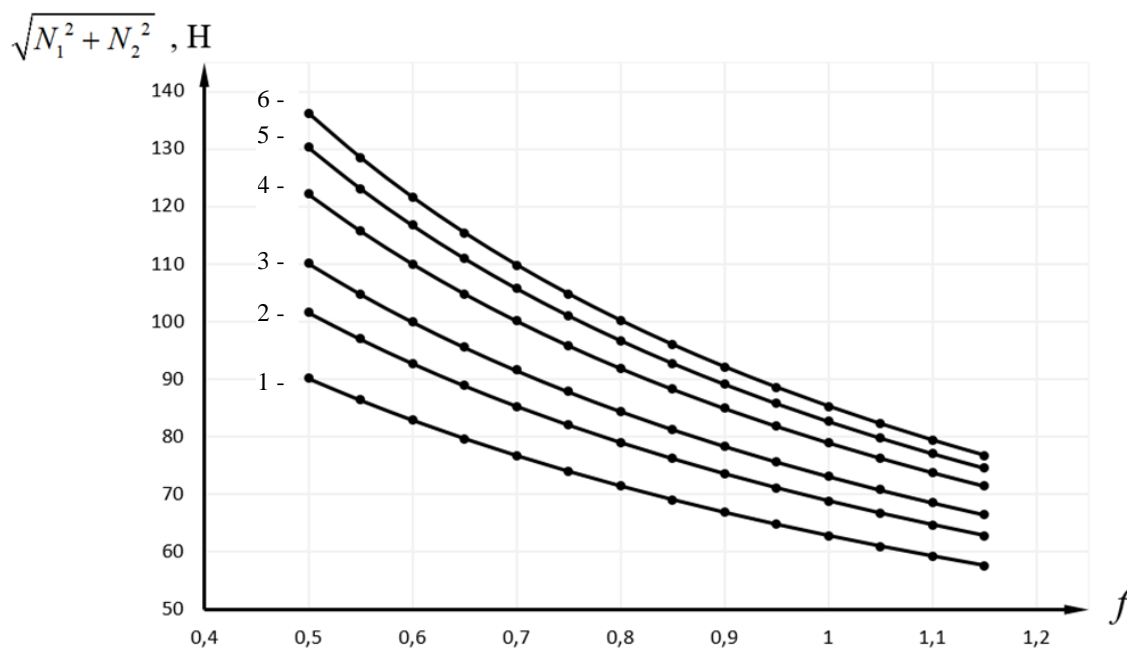


Рис. 8. График зависимости  $\sqrt{N_1^2 + N_2^2}$  от коэффициента трения  $f$

### Выводы

Решена плоская задача о равновесии робототехнической системы, использующей в качестве одноопорного механизма один линейный привод для перемещения робота по произвольно ориентированным поверхностям:

– теоретически доказана работоспособность предложенной робототехнической системы на произвольно ориентированной поверхности;

– получены уравнения равновесия такой робототехнической системы и выражения для определения места установки линейного привода, определяемого числом  $\varepsilon$ , обеспечивающие отсутствие изгиба в одноопорном механизме;

– определены массово-геометрические параметры, линейные и угловые размеры всей робототехнической системы, обеспечивающие оптимальные усилия линейного привода.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Градецкий, В. Г. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных

сред / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 1 (2). – С. 9–16.

2. Градецкий, В. Г. Роботы вертикального перемещения / В. Г. Градецкий, М. Ю. Рачков. – М.: Тип. Мин-ва образования РФ, 1997. – 223 с.

3. Biomimetic mushroom-shaped fibrillary adhesive microstructure / S. Gorb, M. Varenberg, A. Peressadko, J. Tuma // J. R. Soc. Interface. – 2006. – P. 1–6.

4. Parker, R. Robotics in forestry / R. Parker, K. Bayne, P. W. Clinton // New Zealand Journal of Forestry. – 2016. – 60 (4). – Pp. 8–14.

5. Побегайлов, О. А. Мобильные роботы вертикального перемещения / О. А. Побегайлов, И. В. Кравченко, С. О. Кожуховский // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 4(14). – С. 85–95.

6. Хачатрян, А. А. Мобильные робототехнические системы, перемещающиеся произвольно ориентированным поверхностям: основные недостатки, достоинства, перспективы использования / А. А. Хачатрян // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (263) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 57–64.

7. Hirose, S. Ceiling Walk of Quadruped Wall Climbing Robot NINJA-II / S. Hirose, K. Kawabe // Proc. Int. Conf. on Walking and Climbing Robots (CLAWAR '98), Brussels, Belgium. – 1998.

8. Development of Magnetic Bridge Inspection Robot Aimed at Carrying Heavy Loads / Yogo Takada // Department of Mechanical and Physical Engineering, Osaka City. Univer-

sity, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, Osaka, 558-8585, Japan. Accepted: September 18, 2018. – Published: September 20, 2018.

9. City Climber: a new generation of mobile robot with wall-climbing capability / J. Xiao, W. Morris, N. Chakravarthy, A. Calle // Proc. of the SPIE. – 2006. – Vol. 6230. – P. 62301.

10. Барсов, В. С. Об управлении движением робота с поворотнo-заклинивающими движителями / В. С. Барсов, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (226) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 7–12.

11. Кинематическое исследование манипулятора трипода / В. М. Герасун, В. В. Жога, И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева, В. В. Дяшкин-Титов // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. – СПб.,

2012. – С. 251–258.

12. Разработка базы моделей манипулятора параллельно-последовательной структуры / Н. С. Воробьева, В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, А. В. Дяшкин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 9(194). – С. 143–152.

13. Ефимов, М. И. О рациональном проектировании тросового робота вертикального перемещения / М. И. Ефимов, Е. С. Брискин // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2021 : Материалы XIV мультиконференции : в 4 т. Дивноморское, Геленджик, 27 сентября – 02 октября 2021 года. – Ростов н / Д : Южный федеральный университет, 2021. – С. 37–40.

14. Коэффициент трения покоя резины [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.highexpert.ru/content/elastomers/rubber\\_dry\\_cof\\_static.html](https://www.highexpert.ru/content/elastomers/rubber_dry_cof_static.html).

Ответственный за выпуск  
Ирина Петровна **ВЕРШИНИНА**

Оригинал-макет и электронная версия издания  
подготовлены редакционно-издательским отделом  
Издательства ВолГТУ

Корректурa **Л. Н. Рыжих**  
Компьютерная верстка: **Е. В. Макарова**

---

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.  
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

---

**Учредитель:**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолГТУ)

---

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.  
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)  
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00  
**E-mail:** president@vstu.ru

---

Темплан 2022 г. Поз. № 8ж. Дата выхода в свет 19.09.2022 г. Формат 60 x 84 1/8. Бумага офсетная.  
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,09. Уч.-изд. л. 12,63. Тираж 100 экз. Свободная цена.  
Заказ № 377.

Отпечатано в типографии Издательства ВолГТУ  
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.



## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

---

В научном журнале «Известия ВолгГТУ», серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы», публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований в области механики и управления движением робототехнических систем и их мехатронных узлов.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word 2003-2007 и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм). УДК статьи обязательно.

Для ускорения подготовки издания необходимо отправлять файлы статей на электронный адрес [rm@vstu.ru](mailto:rm@vstu.ru) в полном соответствии с распечатанным оригиналом.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см; нижнее – 3,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора формул следует использовать встраиваемый формульный процессор Math Type. Формулы в тексте должны быть напечатаны без дополнительных интервалов между строками текста. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Нумерация формул по всей статье должна быть сквозной. Таблицы должны содержать заголовки. В компьютерном варианте иллюстрации следует готовить в векторных форматах. В растровых форматах допускаются только фотографии.

В тексте, формулах и на рисунках латинские буквы следует набирать *курсивом*. Русские и греческие буквы, цифры, стандартные функции (sin, cos, sign, max, const, log, det, exp и т. п.) должны иметь прямое начертание. В основе матриц лежат круглые скобки, в основе определителей – прямые линии.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, на котором работает автор статьи. Если коллектив авторов включает сотрудников различных учреждений, необходимо указать место работы каждого автора. Далее – электронный адрес (-а) авторов, аннотация к статье и ключевые слова (на русском и английском языках). В конце статьи ставится подпись автора (на бумажном варианте).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Рекомендованный объем статьи – **8–9 страниц** бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список.

Рекомендуется включать в журнал статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номера служебного и домашнего телефонов, E-mail); документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.