

ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского
государственного
технического
университета

ISSN 1990-5297



Серия
Роботы, мехатроника
и робототехнические системы

16+

№ 4 (287)
2024

Главный редактор научного журнала
«Известия Волгоградского государственного технического университета»
академик РАН, профессор, доктор химических наук,
советник при ректорате 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., чл.-корр. РАН, 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,
ВолГАУ (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

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

Яцун 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 объединенному каталогу
«Пресса России» – 80811
https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/

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

№ 4 (287)

Апрель 2024

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: ianovakov@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*

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:

Novakov I. A. – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, Advisor in the Rector’s Office 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., Corresponding Member of RAS, 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 magazine according to the united catalog «Press of Russia» – 80811.
https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/

Tel. Of VSTU editorial office:

8 (8442) 24-84-05

8 (8442) 24-84-08

zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,
"Izvestia VSTU", 2024

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 4 (287)
April
2024

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: ianovakov@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*

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Афонин Д. В. 6
Баталов А. В. 15
Бахов Т. Б. 20
Безусов С. О. 26
Бордюгов Д. В. 32
Брискин Е. С. 55, 75
Быков А. С. 35, 65
Ветлицын М. Ю. 88
Воробьева Н. С. 41
Воротников С. А. 20
Горобцов А. С. 44, 49
Дементьев Е. В. 55
Дяшкин А. В. 41
Дяшкин-Титов В. В. 41
Жога В. В. 60
Захаров Е. Н. 41
Коломин Н. В. 88
Кошман А. М. 35, 65
Леонард А. В. 35, 65
Нелюбова А. В. 60, 71
Несмиянов И. А. 41
Печурин А. С. 6
Прокопов А. С. 75
Пряничников В. Е. 88
Рыжов Е. Н. 44, 49
Сергеев С. Ф. 81
Смирная Л. Д. 84
Тарасов П. С. 44
Хачатрян А. А. 84
Чесноков О. К. 49
Чигиринская Н. В. 49
Шаронов Н. Г. 88
Шурыгин В. А. 35, 65
Яцун С. Ф. 6

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Афонин Д. В., Печурин А. С., Яцун С. Ф.</i> Управление движением роботизированной колесной системы двух тел, связанной упругим элементом.....	6
<i>Баталов А. В.</i> Обработка биоэлектрического сигнала для управления приводом экзоскелета на основе анализа спектральной плотности.....	15
<i>Бахов Т. Б., Воротников С. А.</i> Использование синтетических данных для фильтрации частиц снега в лидарном облаке точек.....	20
<i>Безусов С. О.</i> О движении группы кинематически последовательно связанных роботов.....	26
<i>Бордюгов Д. В.</i> Об управлении перемещением мобильного робота за счет стационарного движения внутренних масс и нестационарных голономных связей.....	32
<i>Быков А. С., Кошман А. М., Леонард А. В., Шурыгин В. А.</i> Классификация препятствий и способы их аппроксимации для задач обхода статичных препятствий.....	35
<i>Воробьева Н. С., Несмиянов И. А., Дяшкин А. В., Дяшкин-Титов В. В., Захаров Е. Н.</i> Робототехнический комплекс для возделывания овощных культур.....	41
<i>Горобцов А. С., Рыжов Е. Н., Тарасов П. С.</i> Управление локомоцией робота-андроида методом обобщенной задачи динамического уравнивания в невырожденном случае.....	44
<i>Горобцов А. С., Рыжов Е. Н., Чигиринская Н. В., Чесноков О. К.</i> Управление движением робота-собаки методом обратной задачи.....	49
<i>Дементьев Е. В., Брискин Е. С.</i> Конструктивная схема и принцип работы подводной роботизированной транспортной системы.....	55
<i>Жога В. В., Нелюбова А. В.</i> Обоснование расчетной схемы динамики манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью.....	60
<i>Кошман А. М., Быков А. С., Леонард А. В., Шурыгин В. А.</i> Планирование движения мобильного робота со смещением исходного центра потенциального поля статичного препятствия.....	65
<i>Нелюбова А. В.</i> Исследование влияния граничных условий на точность аппроксимации программных перемещений исполнительных приводов манипулятора-трипода.....	71
<i>Прокопов А. С., Брискин Е. С.</i> О точности позиционирования двухсекционного робота.....	75
<i>Сергеев С. Ф.</i> Проблема двойной контингентности в коммуникации человека и робота.....	81
<i>Хачатрян А. А., Смирная Л. Д.</i> Особенности динамики управляемого движения робота, опирающегося на различно ориентированные ровные поверхности.....	84
<i>Шаронов Н. Г., Пряничников В. Е., Коломин Н. В., Ветлицын М. Ю.</i> Методы управления двигателями мобильного робота с кинематически связанными цикловыми шагающими движителями.....	88
К сведению авторов.....	96

УДК 621.865

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-6-14

Д. В. Афонин¹, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун

**УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ
КОЛЕСНОЙ СИСТЕМЫ ДВУХ ТЕЛ,
СВЯЗАННОЙ УПРУГИМ ЭЛЕМЕНТОМ**

Юго-Западный государственный университет

¹teormeh@inbox.ru

Представлена концепция автоматического управления роботизированной системой колесных тел по прямолинейной траектории с упругим элементом. Рассмотрены три стратегии управления: эталонная, корректирующая и комбинированная. Продемонстрирована их эффективность через математическое моделирование и оценку результатов.

Ключевые слова: колесная система, математическое моделирование, динамика колесных тел, комбинированное управление, оптронная матрица.

D. V. Afonin, A. S. Pechurin, S. F. Yatsun

**MOTION CONTROL OF A TWO-CARRIER ROBOTIC
WHEEL SYSTEM LINKED BY ELASTIC FORCE**

The South-West State University

The concept of automatic control of a robotic system of wheeled bodies along a straight trajectory with an elastic element is presented. Three control strategies have been considered: reference, corrective, and combined. Their effectiveness has been demonstrated through mathematical modeling and result evaluation.

Keywords: wheeled system, mathematical modeling, dynamics of wheeled bodies, combined control, optoelectronic matrix.

1. Актуальность

На сегодняшний день мобильные колесные роботы широко используются в логистике, развлечениях, обслуживании, а также в беспилотных такси и доставке [1, 2]. Они экономят финансы и время, автоматизируя рутинные операции, но требуют сложных управляющих законов и решений дифференциальных уравнений.

Исследования описывают методы решения задач управления колесными системами. К примеру, вопросы управления колесными роботами рассматриваются в работах В. А. Бесекерского, А. А. Воронова, А. С. Гноенского, А. В. Нетушила, Е. П. Попова, В. В. Солодовникова, А. А. Фельдбаума, С. Т. Chen, С. А. Desoer, Н. Kwakernaak, R. Kalman, Н. Н. Rosenbrock и других. Особенности управляемости и наблюдаемости мобильных колесных роботов раскры-

ваются в трудах Ю. Г. Мартыненко, Д. М. Гусева, А. И. Кобрина, А. В. Ленского, И. В. Орлова, включая вопросы движения по сигналам оптронной линейки, с учетом переходных процессов в электроприводах и их влияния на устойчивость движения.

Работы Е. А. Девянина и В. М. Буданова анализируют решения дифференциальных уравнений управляемого движения робота с двумя ведущими колесами, параметры для устойчивости такого движения и влияние конструктивных «несимметрий» на фазовый портрет. Работы В. Е. Павловского представляют движение цепочки твердых тел с понятием «робопоезд», а способы управления мобильным роботом с дифференциальным приводом рассматриваются научной школой-конференцией «Мобильные роботы и мехатронные системы».

Большинство исследований рассматривают колесные тела как кинематически связанные, что часто приводит к динамическим разрывам, например, в угловых скоростях колес. Предлагаемый метод использует упругую силу для связи колесных тел. Подобный подход позволяет осуществлять моделирование совместного движения колесных тел и может быть применен в системах буксировки.

2. Математическая модель

Роботизированная колесная система упруго связанная (РКСУС) [3, 4], на расчетной схеме (рис. 1) ведущая колесная платформа (ВКП), обозначенная границами – $I_1A_1B_1$, связана упругой силой со следующей колесной платформой (СКП) с границами – $A_2B_2D_2$, совершають движение в горизонтальной плоскости по шероховатой поверхности. Новизной в предложенной системе является упругая сила, связывающая

ВКП – колесного робота с дифференциальным приводом и СКП – трехколесную платформу без приводов. Точка D_2 определяет место приложения упругой силы к СКП, а D_1 – к ВКП. Для описания положения объектов в пространстве определены три различные системы координат: глобальная X_0OY_0 , в дальнейшем (0) ; относительная, связанная с ВКП X_1OY_1 далее (1) ; относительная, связанная с СКП X_2OY_2 – обозначается как (2) . Для перехода между системами координат используются матрицы (1, 2):

$$T_{10} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$T_{20} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_2 \\ \sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где φ_1, φ_2 – углы поворота ВКП и СКП относительно оси OX_0 .

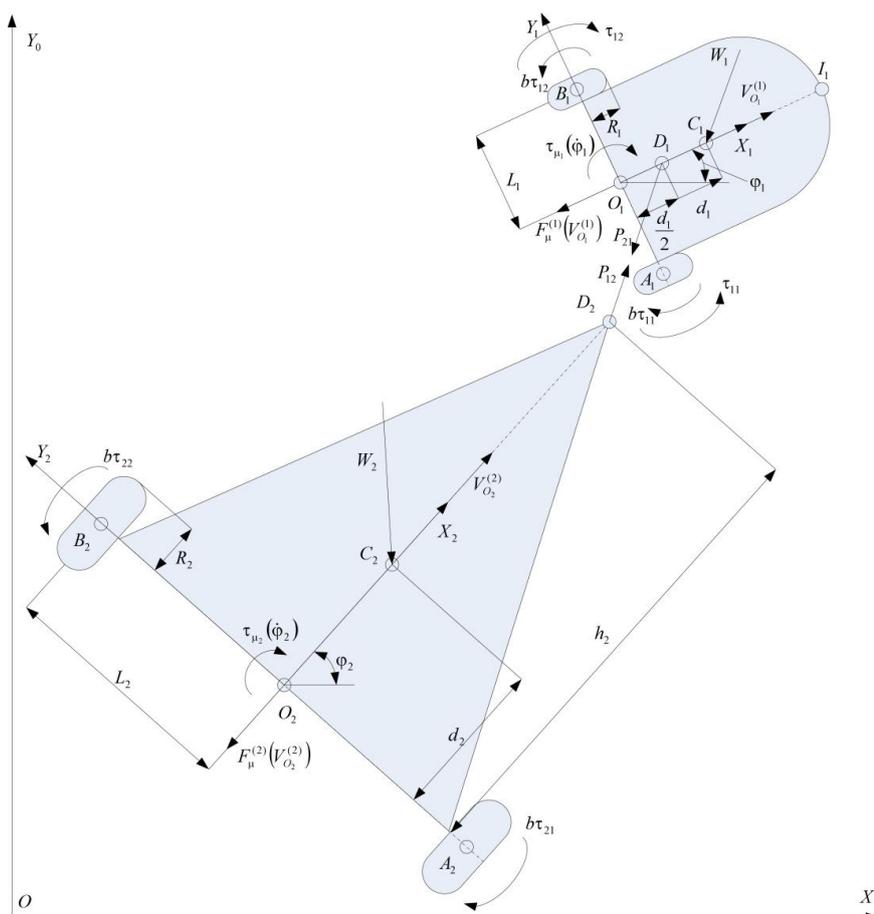


Рис. 1. Схема совместного движения РКСУС

В процессе движения на ВКП и СКП воздействуют: τ_{11}, τ_{12} – управляющие крутящие моменты колес ВКП; моменты торможения право-

го и левого приводных колес ВКП – $b\tau_{11}, b\tau_{12}$ и СКП – $b\tau_{21}, b\tau_{22}$; $F_{\mu}^{(1)}(V_{O_1}^{(1)}), F_{\mu}^{(2)}(V_{O_2}^{(2)})$; $\tau_{\mu 1}(\dot{\varphi}_1), \tau_{\mu 2}(\dot{\varphi}_2)$ – силы и моменты сопротивления дви-

жению РКСУС, где μ_v, μ_ω – коэффициенты вязкости сил сопротивления движению.

Упругой связующей силой является \bar{P}_{2112} , модуль и направление которой зависят от взаимного удаления точек D_1 и D_2 друг от друга (3):

$$\bar{P}_{2112} = \begin{pmatrix} C_X & 0 \\ 0 & C_Y \end{pmatrix} \bar{D}_{12} + \begin{pmatrix} \mu_X & 0 \\ 0 & \mu_Y \end{pmatrix} \dot{\bar{D}}_{12}, \quad (3)$$

где C_X, C_Y – коэффициенты упругости; μ_X, μ_Y – коэффициенты вязкости; $\bar{D}_{12} = \bar{D}_1 - \bar{D}_2$. Переход силы \bar{P}_{2112} из глобальной системы координат в локальные системы платформ происходит с помощью уравнений (4, 5):

$$\bar{P}_{21}^{(1)} = T_{10}^{-1} \cdot \bar{P}_{2112}; \quad (4)$$

$$\bar{P}_{12}^{(2)} = T_{20}^{-1} \cdot \bar{P}_{2112}. \quad (5)$$

Действующие на РКСУС дестабилизирующие воздействия W_1, W_2 описываются как импульсное воздействие силы F_{w_i} , приложенной к центру масс тела C_i и действующей согласно условию (6):

$$t \in [t_1 \ t_2] \Rightarrow \bar{W}_1^{(0)} = F_{w_1} (\cos \gamma \ \sin \gamma)^T, \quad (6)$$

где t – текущее время; t_1 и t_2 – время начала и конца действия силы; γ – угол приложения силы. Преобразование, описывающее дестабилизирующее воздействие в системе координат вешней платформы имеет вид (7):

$$\bar{W}_1^{(1)} = \begin{pmatrix} W_{1x} & W_{1y} \end{pmatrix}^T = T_{10}^{-1} \cdot \bar{W}_1^{(0)}. \quad (7)$$

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} -\frac{\mu_{V_1}}{a_0} & \frac{a_1}{a_0} & 0 & 0 \\ -\frac{a_1}{a_2} & -\frac{\mu_{\Omega_1}}{a_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu_{V_2}}{a_5} & \frac{a_6}{a_5} \\ 0 & 0 & -\frac{a_6}{a_7} & -\frac{\mu_{\Omega_2}}{a_7} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \\ V_2 \\ \Omega_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{a_3}{a_0} (\tau_{11} + \tau_{12}) \\ \frac{a_4}{a_2} (\tau_{11} - \tau_{12}) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{a_0} P_{21x} \\ -\frac{d_1}{2a_2} P_{21y} \\ \frac{1}{a_5} P_{12x} \\ \frac{h_2}{a_7} P_{12y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{R_b a_0} (b\tau_{11} + b\tau_{12}) \\ -\frac{L_1}{R_b a_2} (b\tau_{11} - b\tau_{12}) \\ -\frac{1}{R_b a_5} (b\tau_{21} + b\tau_{22}) \\ -\frac{L_2}{R_b a_7} (b\tau_{21} - b\tau_{22}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{1}{a_0} W_{1x} \\ -\frac{d_1}{a_2} W_{1y} \\ -\frac{1}{a_5} W_{2x} \\ -\frac{d_2}{a_7} W_{2y} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $a_0 = m_1 + 2 \cdot I_{w_1} / R_1^2$; $a_1 = d_1 \cdot m_{C_1} \cdot \omega_1$; $a_2 = I_1 + (2 \cdot L_1^2 / R_1^2) \cdot I_{w_1}$; $a_3 = 1 / R_1$; $a_4 = L_1 / R_1$; $a_5 = m_2 + 2 \cdot I_{w_2} / R_2^2$; $a_6 = d_2 \cdot m_{C_2} \cdot \omega_2$; $a_7 = I_2 + (2 \cdot L_2^2 / R_2^2) \cdot I_{w_2}$.

В векторно-матричной форме уравнение (9) имеет вид (10, 11):

$$\dot{X} = A(\bar{X}) + B\bar{U} + \bar{W}, \quad \bar{X} = (V_1, \Omega_1, V_2, \Omega_2)^T. \quad (10, 11)$$

Основываясь на том, что уравнения связи предполагают отсутствие проскальзывания колес [5, 6] были составлены кинематические уравнения движения системы двух колесных платформ в матричной форме (8):

$$\dot{q}_{10 \times 1} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1/R_1 & L_1/R_1 & 0 & 0 \\ 1/R_1 & -L_1/R_1 & 0 & 0 \\ \cos \varphi_2 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1/R_2 & L_2/R_2 & 0 & 0 \\ 1/R_2 & -L_2/R_2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dot{\pi}_{4 \times 1}, \quad (8)$$

где в качестве компонентов вектора псевдоскоростей $\dot{\pi} = (V_1 \ \Omega_1 \ V_2 \ \Omega_2)^T$ удобно выбрать величины V_1 и V_2 скорости точек O_1 и O_2 соответственно, а также угловые скорости платформ $\Omega_1 = \dot{\varphi}_1$ и $\Omega_2 = \dot{\varphi}_2$.

Формирование системы дифференциальных уравнений движения РКСУС базируется на описанном в [7] динамическом подходе Лагранжа для неголономных систем и тождеств. В том числе рассматривались уравнения Маджи и работы, посвященные описанию движения цепочки твердых тел, связанных между собой [8–14]. В системах координат ^(1,2) уравнение движения РКСУС описывается в виде (9):

3. Структурная схема системы управления роботизированной колесной системой

Блок планирования рассчитывает эталонный закон движения, разработанный на базе метода планирования допустимых траекторий движения, основанный на заданной точности движения колесной системы [15, 16]. Зависимости координаты (12), скорости (13) и ускорения (14) от времени представлены в виде:

$$X_M^*(t) = \sum_{i=0}^5 a_i t^i; \quad (12)$$

$$V_M^*(t) = \sum_{i=0}^5 a_i i t^{i-1}; \quad (13)$$

$$\dot{V}_M^*(t) = \sum_{i=0}^5 a_i i(i-1)t^{i-2}. \quad (14)$$

Исходя из задачи обеспечения автономного движения РКСУС по заданной траектории, была разработана система управления, структурная схема которой представлена на рис. 2. Основными элементами системы являются блок планирования (БП), эталонная модель (ЭМ), регулятор, объект управления (ОУ), оптронная матрица (ОМ) – набор упорядоченно расположенных оптронов для детектирования контрастной линии, обработчик сигналов оптронной матрицы (ОСОМ) [17–20].

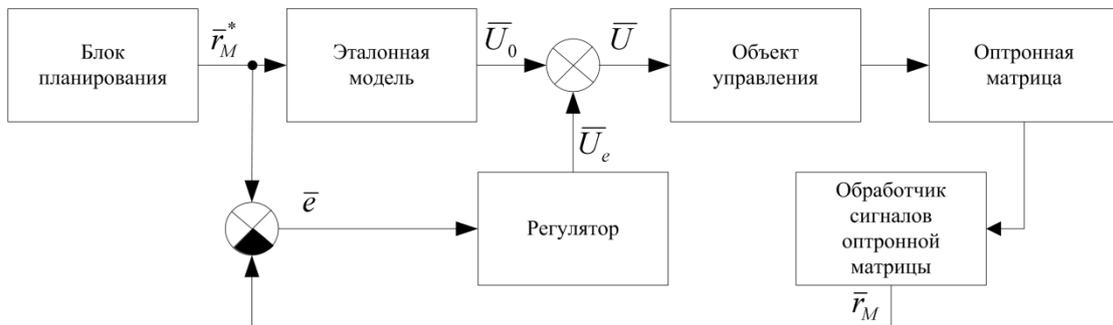


Рис. 2. Структурная схема системы управления РКСУС

Эталонная модель в составе системы управления используется для задания эталона желаемого поведения, выбранного оператором на основе априорной информации о выходных и входных воздействиях, и определяет эталонные управляющие крутящие моменты ВКП.

Архитектура системы управления движением РКСУС основывается на декомпозиции управляющих воздействий. Уравнения электропривода позволяют перейти от управляющих крутящих моментов колес к управляющим напряжениям (15):

$$\bar{U} = \bar{U}_0 + \bar{U}_e, \quad (15)$$

где $\bar{U}_0 = f(\bar{\tau}_0)$ – управляющие напряжения, рассчитываемые из уравнений эталонной моде-

ли; $\bar{U}_e = f(\bar{e})$ – корректирующие напряжения, вычисляемые по расхождению реальной и заданной траектории движения. На заданном интервале идентифицируемых параметров вычисляются параметры регулятора в номинальном режиме.

3.1. Расчет управляющих моментов с помощью эталонной модели

Математическая эталонная модель РКСУС рассчитывается на основе дифференциальных уравнений динамики ВКП. Эта модель учитывает заданные законы движения, силы и моменты сопротивления, а также возмущающее воздействие \bar{W}_1 с учетом запаздывания, и позволяет определить эталонные управляющие воздействия (16, 17):

$$\begin{bmatrix} \tau_R + \tau_L \\ \tau_R - \tau_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \cdot \left(\left(m_s + \frac{2 \cdot I_{W_1}}{R_1^2} \right) \cdot \dot{V}_M^*(t) - d_1 \cdot m_{C_s} \cdot \omega_1^{*2}(t) + xP_{21} + xW_1(t) \cdot \delta(t) + \mu_v \cdot \text{sign}(V_M^*(t)) \cdot |V_M^*(t)| \right) \\ \frac{R_1}{L_1} \cdot \left(\left(J_s + \frac{2 \cdot I_{W_1} \cdot L^2}{R_1^2} \right) \cdot \dot{\omega}_1^*(t) + d_1 \cdot m_{C_s} \cdot \omega_1^*(t) \cdot V_M^*(t) + yP_{21} \cdot \frac{d_1}{2} + yW_1(t) \cdot d_1 \cdot \delta(t) + \mu_w \cdot \text{sign}(\omega_1^*(t)) \cdot |\omega_1^*(t)| \right) \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$\bar{\tau}_0 = \begin{pmatrix} \tau_{110} \\ \tau_{120} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \tau_R + \tau_L \\ \tau_R - \tau_L \end{pmatrix}, \quad (17)$$

где $t \in [t_1 + \eta \quad t_2] \Rightarrow \delta(t) = 1$ – активатор задержки, моделирующий реакцию акселерометра;

η – время задержки; $m_s = m_1 + m_2$, $m_{c_s} = m_{c_1} + m_{c_2}$ – общие массы и суммарные массы ВКП и СКП.

3.2. Управление по ошибке

Управление движением РКСУС на основе ошибки \bar{U}_e [21–23] (рис. 3) происходит путем вычисления управляющих воздействий как функции разницы между координатами

$$\bar{\tau}_e = \begin{pmatrix} \tau_{11e} \\ \tau_{12e} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_p & k_p \\ k_p & -k_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_d & k_d \\ k_d & -k_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta e_x / \Delta t \\ \Delta e_y / \Delta t \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где k_p и k_d – коэффициенты регулятора; $\bar{\tau}_e$ – корректирующее управляющие крутящие моменты ВКП.

Детектирование возникающей ошибки пе-

желаемой и текущей позиции (18):

$$\bar{e} = \begin{pmatrix} e_x & e_y \end{pmatrix}^T = \bar{M}^* - \bar{M}^{(0)}, \quad (18)$$

где $\bar{M}^* = (X_M^*(t) \ 0)^T$ – желаемая и $\bar{M}^{(0)}$ – реальная координаты точки M . Корректирующее управляющее воздействие $\bar{\tau}_e = f(\bar{e})$ определяется согласно уравнению (19):

ремещения вдоль оси OX_0 производится с помощью одометров на колесах, а матрица оптронных пар используется для нахождения ошибки перемещения вдоль оси OY_0 .

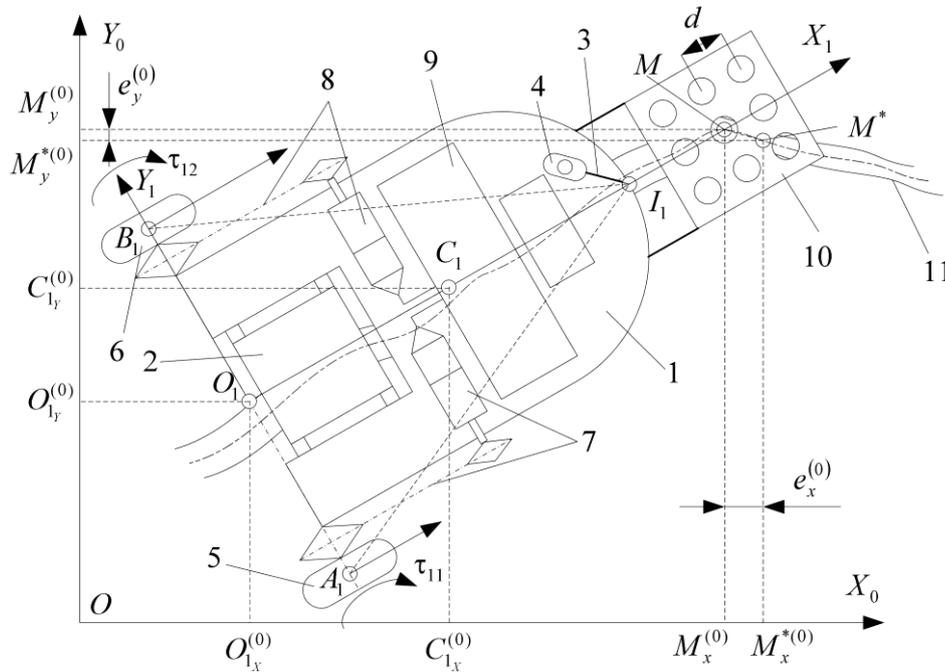


Рис. 3. Структурная схема РКСУС:

1 – корпус ВКП; 2 – цепное устройство; 3 – опора поворотного колеса СКП; 4 – поворотное колесо СКП; 5, 6 – правое и левое ведущие колеса соответственно; 7, 8 – приводы правого и левого ведущих колес соответственно; 9 – аккумуляторная батарея; 10 – оптронная матрица; 11 – контрастная линия

4. Определение положения ВКП относительно траектории движения

Контроль положения РКСУС относительно контрастной линии (КЛ) осуществляется при помощи ОМ, как показано на рис. 4 [24, 25]. ОМ позволяет оценить отклонение реального положения ВКП от заданного, и точность этой оценки зависит от расстояния между оптронными парами в матрице.

При позиционировании ОМ относительно КЛ в желаемом положении (рис. 4, а), выход-

ные сигналы датчиков имеют вид $optMatOut = (101;101;101)$, следовательно, аппарат движется вдоль линии. Если выходные сигналы датчиков будут иметь вид $(110;101;011)$ или $(011;101;110)$ (рис. 4, б, в), то угол ориентации РМБ: $\varphi_1 \approx +45^\circ$ и $\varphi_1 \approx -45^\circ$ относительно КЛ. Сигналы вида $(111;000;111)$ (рис. 4, г) оповещают об угле ориентации $\varphi_1 \approx 90^\circ$.

В случаях, представленных на рис. 4, д и 4, е, угол поворота относительно линии

$\varphi_1 \in [90^\circ \ 180^\circ]$, поскольку в этих состояниях выходные значения матриц одинаковы со случаями на рис. 4, в и 4, а, используется програм-

мный инструмент, интерпретирующий текущее состояние сигналов ОМ, с учетом сравнения значений датчиков на текущей и предыдущих итерациях.

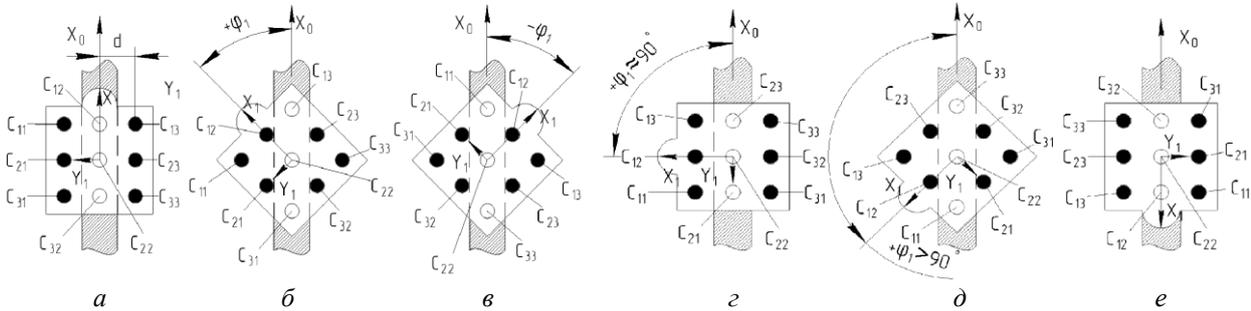


Рис. 4. Определение ориентации ВКП относительно КЛ с помощью ОМ

Структура сигнала обратной связи оптронной матрицы

Переход системы в режим корректировки движения происходит согласно срабатыванию условия (20):

$$c_G = \begin{pmatrix} C_{G_R} & 0 \\ 0 & C_{G_L} \end{pmatrix} = \begin{cases} optMatOut \neq (101;101;101) & C_{G_R}, C_{G_L} \in [0, 0.1, \dots, 1] \\ |e_y| \rightarrow d(0.5 + \sqrt{2}) & C_{G_R}, C_{G_L} \rightarrow 1 \end{cases}, \quad (20)$$

где C_G – матрица, содержащая коэффициенты усиления корректирующего воздействия, уве-

личивающиеся по мере роста ошибки. С учетом (20) выражение (19) преобразуется к виду (21):

$$\bar{\tau}_e = \begin{pmatrix} \tau_{11_e} \\ \tau_{12_e} \end{pmatrix} = C_G \left(\begin{pmatrix} k_p & k_p \\ k_p & -k_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_d & k_d \\ k_d & -k_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta e_x / \Delta t \\ \Delta e_y / \Delta t \end{pmatrix} \right). \quad (21)$$

Точность положения ОМ над КЛ определяется параметром d .

Оценка интервала ошибки по показаниям элементов ОМ согласно условиям (22):

$$e_y = \begin{cases} |e_y| \in [0 \ 0.5d] & C_{22} = 0 \\ |e_y| \in [0 \ 1.5d] & C_{22} \neq 0 \wedge (C_{21} = 0 \vee C_{23} = 0) \\ |e_y| \in [0.5d \ d(0.5 + \sqrt{2})] & C_{22} \neq 0 \wedge (C_{11} = 0 \vee C_{13} = 0 \vee C_{31} = 0 \vee C_{33} = 0) \end{cases}, \quad (22)$$

5. Тестирование системы в идеальных условиях, а также при наличии возмущающего воздействия

Для проверки представленного алгоритма управления РКСУС было проведено численное математическое моделирование. Движение происходило из начальной точки в конечную по прямолинейному отрезку траектории за время $t \in [0 \ 30]$ с. Во время движения на систему действовал прямоугольный возмущающий импульс (рис. 5), описываемый в (6, 7), при условиях: $t_1=14,5$ с; $t_2=15$ с; $\tau=0,5$ с; $\gamma=45^\circ$; $F_{W_1} = 40$ кН.

Заданный закон и реальная траектория движения вдоль осей OX_0 и OY_0 показаны на рис. 6 вместе с графиками изменения ошибок e_x, e_y . При сравнении максимальных значений ошибок e_x, e_y при различных стратегиях управления было установлено, что корректирующее управление обеспечивает максимальные отклонения вдоль осей OX_0 и OY_0 менее 1 м, а комбинированное уменьшает отклонения до значений менее 0,25 м, что значительно повысило точность движения РКСУС по заданной траектории. На рис. 7 представлены графики изменения управляющих сил, полученных методом декомпозиции управляющих воздействий при комбинированном управлении.

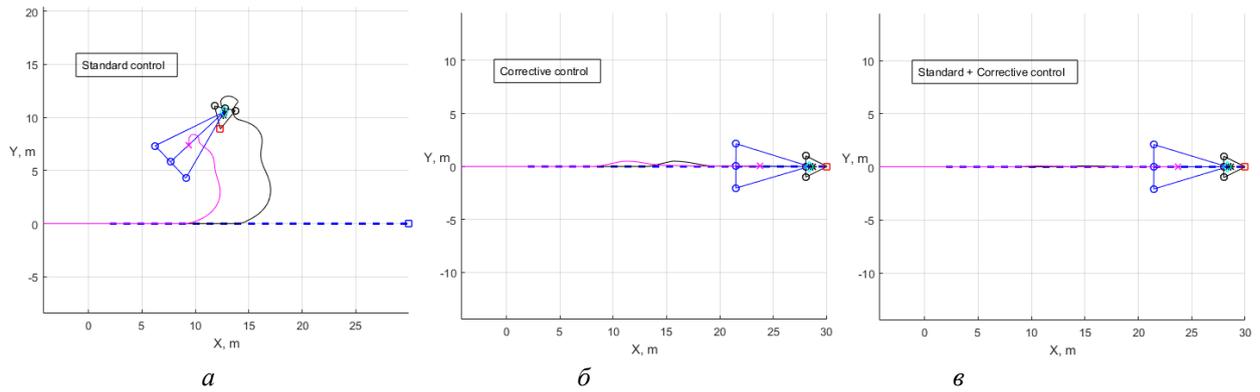


Рис. 5. Результаты прохождения заданной траектории в зависимости от типа управления:
 a – эталонное, b – корректирующее, c – комбинированное

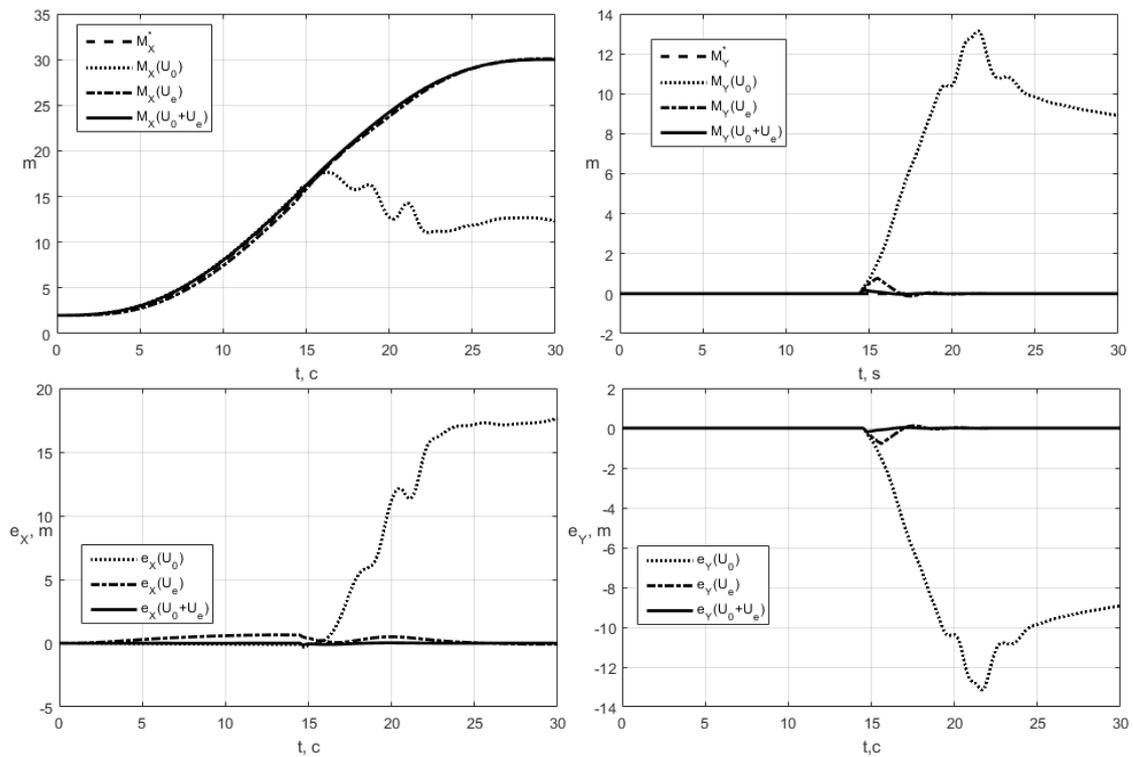


Рис. 6. Графики изменения: желаемых и реальных законов движения вдоль осей OX_0 и OY_0 ;
отклонение реальных координат от заданных e_x, e_y : при эталонном (пунктир);
корректирующем (пунктир-точка) и комбинированном (сплошная) управлении

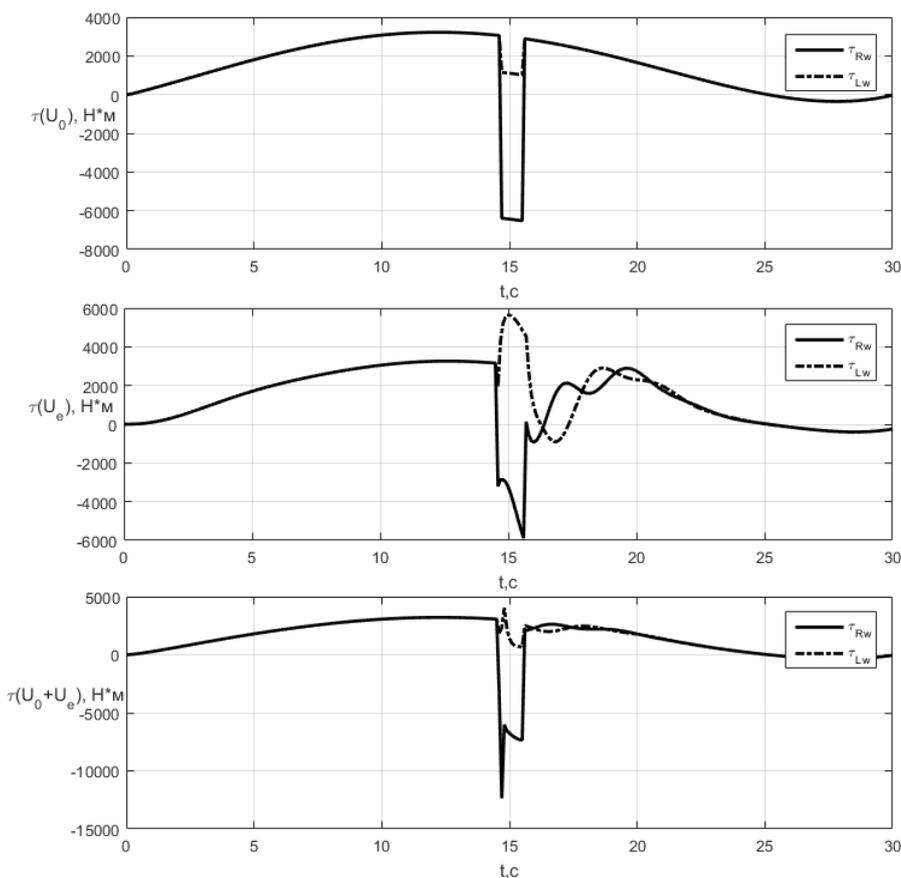


Рис. 7. Графики изменения управляющих крутящих моментов колес ВКП: эталонном (пунктир); корректирующем (пунктир-точка) и комбинированном (сплошная) управлении

Результаты оценки эффективности, представленные ниже в таблице, показывают, что комбинированная стратегия управления обес-

печивает лучшее качество движения, но при этом увеличивает энергозатраты.

Сравнительная таблица стратегий управлений

Критерий \ Тип управления	Эталонная модель $U=U_0$	Корректирующее управление $U=U_e$	Комбинированное управление $U = U_0+U_e$
Среднеквадратичная ошибка K_1	4072	4.566	1.145
Среднеквадратичные энергозатраты K_2	$1.665e+10^9$	$1.633e+10^9$	$1.742e+10^9$

Выводы

Предложенный метод упругого взаимодействия колесных тел, основанный на упругой силе, позволил без динамических разрывов моделировать их движение.

Разработанный метод контроля перемещения РКСУС, основанный на логической обработке сигналов, поступающих от опорной матрицы, продемонстрировал свою работоспособность в ходе численного моделирования движения системы.

Метод расчета управляющих моментов ба-

зировался на суммировании воздействий от эталонной модели и корректирующих сигналов от опорной матрицы. Математическое моделирование управляемого движения проведено для оценки качества управления, энергопотребления и анализа влияния крутящих моментов на динамику колесной системы под импульсным воздействием.

Представленный подход обеспечил хорошие результаты буксировки и подтвердил эффективность комбинированного управления, но с увеличением энергозатрат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гарькушев, А. Ю.* Применение роботизированных платформ для обеспечения транспортной безопасности / А. Ю. Гарькушев, М. С. Назарова // Актуальные проблемы защиты и безопасности. – 2020. – С. 294–297.
2. *Salmerón Rodríguez J.* Use of robotic systems on airport management optimization : дис. / Salmerón Rodríguez J. – Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.
3. Моделирование движения робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / С. Ф. Яцун, В. В. Бартнев, Е. Н. Политов, Д. В. Афонин // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2018. – № 22(2). – С. 34–43.
4. *Politov, E.* Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot / E. Politov, D. Afonin, V. Bartenev // In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin’s Readings” ER (ZR) 2019, 2020, Kursk, Russia, 17–20 April 2019 (pp. 397–409).
5. *Павловский, В. Е.* Исследование динамики движения цепочки «Робопоезд». Уравнения движения, частные решения / В. Е. Павловский, Н. В. Петровская // Препринты ИПМ им. МВ Келдыша. – 2005. – Т. 117. – С. 31.
6. *Martins, F. N.* A velocity-based dynamic model and its properties for differential drive mobile robots / F. N. Martins, M. Sarcinelli-Filho, R. Carelli // Journal of intelligent & robotic systems. – 2017. – V. 85. – № 2. – P. 277.
7. *Dhaouadi, R.* Dynamic modelling of differential-drive mobile robots using lagrange and newton-euler methodologies: A unified framework / R. Dhaouadi, A.A. Hatab // Advances in Robotics & Automation. – 2013. – V. 2. – № 2. – Pp. 1–7.
8. *Мартыненко, Ю. Г.* Динамика мобильных роботов / Ю. Г. Мартыненко // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – № 5. – С. 110–116.
9. *Мартыненко, Ю. Г.* Управление движением мобильных колесных роботов / Ю. Г. Мартыненко // Фундаментальная и прикладная математика. – 2005. – Т. 11. – № 8. – С. 29–80.
10. *Ефремов, К. С.* Исследование базовых маневров движения многозвенных колесных роботов / К. С. Ефремов, В. А. Шестаков // Выставка инноваций-2020 (весенняя сессия). – 2020. – С. 69–73.
11. *Liang, Z.* Modelling and optimisation of high-efficiency differential-drive complementary metal – oxide – semiconductor rectifier for ultra-high-frequency radio-frequency energy harvesters / Z. Liang, J. Yuan // IET Power Electronics. – 2019. – V. 12. № 3. – P. 588.
12. *Leena, N.* Modelling and trajectory tracking of wheeled mobile robots / N. Leena, K. K. Saju // Procedia technology. – 2016. – V. 24. – P. 538.
13. *Seegmiller, N.* High-fidelity yet fast dynamic models of wheeled mobile robots / N. Seegmiller, A. Kelly // IEEE Transactions on robotics. – 2016. – V. 32. № 3. – P. 614.
14. *Hendzel, Z.* Modelling of dynamics of a wheeled mobile robot with mecanum wheels with the use of Lagrange equations of the second kind / Z. Hendzel, L. Rykala // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. – 2017. – V. 22. № 1. – P. 81.
15. *Richter, C.* Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments / C. Richter, A. Bry, N. Roy // Robotics research. – Springer, Cham, 2016. – С. 649–666.
16. *Wang, H.* Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve / Wang H. et al. // Mechanism and Machine Theory. – 2019. – V. 139. – Pp. 284–293.
17. *Esan, O.* Review on Autonomous Indoor Wheel Mobile Robot Navigation Systems / O. Esan, S. Du, B. Lodewyk // 2020 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD). IEEE, 2020. – P. 1.
18. *Rafi, R. H.* Design & implementation of a line following robot for irrigation based application / R. H. Rafi et al. // 2016 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT). – IEEE, 2016. – Pp. 480–483.
19. *Bartenev, V. V.* Motion control of mobile wheeled robots on the base of the signal of optron matrix / V. V. Bartenev, S. F. Yatsun // Proceedings of the 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg: State Research Center of the Russian Federation – Central Scientific & Research Institute Elektropribor, 2010. – P. 279.
20. *Alatise, M. B.* A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods / M. B. Alatise, G. P. Hancke // IEEE Access. – 2020. – V. 8. – Pp. 39830–39846.
21. *Simon, J.* Autonomous wheeled mobile robot control / J. Simon // Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS. – 2017. – 15(3). – Pp. 222–227.
22. *Shih, C. L.* Trajectory planning and tracking control of a differential-drive mobile robot in a picture drawing application / C. L. Shih, L. C. Lin // Robotics. – 2017. – 6(3). – P. 17.
23. *Lee, K.* Design of fuzzy-PID controller for path tracking of mobile robot with differential drive / K. Lee et al. // International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems. – 2018. – V. 18. № 3. – P. 220.
24. *M. Sri Venkata Sai Surya.* Smart and Intelligent Line Follower Robot with Obstacle Detection / M. Sri Venkata Sai Surya et al. // International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI). – 2018. – V. 5.
25. *Roy, A.* Design of a high-speed line following robot that smoothly follows tight curves / A. Roy, M. M. Noel // Computers & Electrical Engineering. – 2016. – V. 56. – Pp. 732–747.

УДК 007.51

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-15-19

*А. В. Баталов***ОБРАБОТКА БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ЭКЗОСКЕЛЕТА
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ****Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых**

a.batalov@mail.ru

В статье выделены такие проблемы, как влияние низкочастотных помех, входящих в частотный диапазон биоэлектрического сигнала; высокочастотные наведенные и синфазные помехи, вносящие значимые погрешности в процесс измерения. Разработан метод спектрального анализа исходного сигнала, позволяющий уменьшить влияние на конечный сигнал определенного вида помех.

Ключевые слова: биоэлектрический потенциал, экзоскелет, биомеханика, неинвазивная регистрация сигнала, спектральный анализ.

*A. V. Batalov***BIOELECTRIC SIGNAL PROCESSING FOR EXOSKELETON
DRIVE CONTROL BASED ON SPECTRAL DENSITY ANALYSIS****Vladimir State University A. G. and N. G. Stoletovs**

The article highlights such problems as the influence of low-frequency interference included in the frequency range of the bioelectric signal, high-frequency induced and common-mode interference, which introduce significant errors in the measurement process. A method has been developed for spectral analysis of the original signal, which makes it possible to reduce the influence of a certain type of interference on the final signal.

Keywords: bioelectric potential, exoskeleton, biomechanics, non-invasive signal recording, spectral analysis.

Введение

На сегодняшний день во многих областях возрастает необходимость значительного расширения человеческих возможностей (в том числе физических возможностей). Тенденцию можно проследить, обратив внимание на все увеличивающееся количество научных и коммерческих проектов, так или иначе пытающихся решить эту проблему. Одним из способов расширения физических возможностей человека является применение различного рода экзоскелетов. Экзоскелеты, как правило, делятся на несколько категорий в зависимости от выбранного параметра. В рамках данной работы будет рассматриваться категория активных экзоскелетов, то есть имеющих отдельный источник питания и использующих накопленную в нем энергию [1].

Сегодня разработка оптимального способа управления активным экзоскелетом начинает превалировать над кинематической реализацией его конструкции. Отечественные и зарубежные ученые сейчас проводят множество исследований по способности применения различных принципов управления для достижения наилучших характеристик по выбранным критериям. Исследования в области регистрации

и обработки биоэлектрического сигнала на сегодняшний день ориентированы в большинстве на медицинскую отрасль. Как пример, диагностическая миография направлена на выявление неврологических проблем опорно-двигательного аппарата. Степень же научной разработанности проблемы регистрации и обработки биоэлектрического сигнала для генерации управляющего воздействия несколько уже. За рубежом по вопросам регистрации биопотенциалов опубликовано достаточно большое количество монографических работ и статей [2]. Среди них особо следует отметить научные исследования Г. Александера, Д. Бейли, П. Роуза, Д. Диамонда, Р. Гобела.

Управляющее воздействие на привод выбирается на основании типа его регулирования. Однако в общем случае для управляющего воздействия свойственна передача основного параметра «намерения движения». Эта величина может быть рассчитана для каждого звена экзоскелета. Ее задача – насколько можно раньше и точнее спрогнозировать движение оператора.

Одним из способов прогнозирования движения является регистрация биоэлектрической активности на разных этапах ее генерации. Такой способ лишен недостатка в быстродействии,

поскольку регистрация биоэлектрической активности, например мышцы, приводящей в движение сустав, происходит до начала непосредственно движения, в точности под определение «намерение движения». Быстродействие здесь будет определяться тем, сколько времени потребуется для регистрации и обработки исходного сигнала.

Одной из основных проблем регистрации биоэлектрического сигнала в портативных системах является сложность фильтрации и интерпретации полученного сигнала в значение для привода. Причиной этого служит множество факторов, но самые значимые из них – наведенные высокочастотные помехи на электроды, случайные выбросы в диапазоне измеряемой частоты и меняющееся смещение исходного сигнала.

Для уменьшения влияния вышеперечисленных факторов предлагается использовать ряд фильтров, разделяющих исходный сигнал по спектру на несколько зон и формирующих спектральный рисунок, характерный для миографического сигнала.

Материалы и методы

В качестве эталонного сигнала для определения влияния помех и эффективности разработанного алгоритма в работе будет использован биоэлектрический сигнал, снятый и оцифрованный со стационарного медицинского миографа. При помощи математической модели, построенной в среде динамического междисциплинарного моделирования сложных технических систем Simulink, в исходный сигнал будут внесены различные типы помех и определится эффективность алгоритма к их подавлению.

Основная часть

Регистрация биоэлектрической активности в системах управления экзоскелета подразделяется, в основном, на два типа: электроэнцефалограмма (ЭЭГ) и электромиография (ЭМГ). Электромиография существенно проще в реализации. Она основана на регистрации наведенного биопотенциала активной мышцы. В быстродействии она проигрывает электроэнцефалограмме, однако позволяет с высокой достоверностью определить активность мышцы еще до начала непосредственного движения. Для управления активным экзоскелетом этого достаточно.

Согласно исследованию по измерению импеданса на границе электрод – кожа двух типов

поверхностных ЭМГ-электродов при длительных записях, опубликованному в работе [3], частотный диапазон лежит в пределах 10–400 Гц. Также потенциал покоя мембраны мышечного волокна составляет 80–90 мВ. Когда нервная клетка возбуждается на гребне аксона, образуется потенциал действия, распространяющийся вдоль аксона. Распространение нервного импульса по аксону происходит за счет последовательной деполяризации мембраны с образованием потенциала действия со скоростью около 15–120 м/с. Продолжительность потенциала действия мышечного волокна составляет 3–5 мс. Поэтому максимальное количество импульсов, способных воспроизвести мышцу, составляет не более 200–300 импульсов в секунду [4].

Далее (рис. 1) приведены исходный сигнал, записанный на стационарном миографе с частотой дискретизации 4 кГц, и его спектральная плотность.

Специфика спектральной плотности миографического сигнала заключается в характерном для двигательной активности резком спаде в диапазоне 0–300 Гц [5]. Эту особенность предполагается использовать для фильтрации помех, возникающих в процессе регистрации и выходящих за пределы определенного шаблона. Амплитуда биоэлектрического мышечного сигнала колеблется от 20 мкВ до 30 мВ. Достаточно широкий диапазон значений связан с физиологическими особенностями каждого человека [6].

Для регистрации величины стимуляции мышцы необходимо разделить спектральный рисунок на несколько зон, вносящих разное влияние на выходное значение. Так как спектральная плотность миографического сигнала неоднородна, это позволяет оценивать полученный сигнал, корректируя входные значения на коэффициенты, соответствующие своей спектральной зоне. Обычно имеющие наибольшую интенсивность помехи, могут лежать в диапазоне от 0 до 300 Гц. Этот диапазон был разделен на пять зон (рис. 2) с соответствующей степенью ослабления сигнала.

Исходя из спектральной картины, чем выше частота исходного сигнала, тем меньше полезной информации, в контексте управления экзоскелетом, он несет, и если рассматривать диапазон высоких частот (от 150 Гц и выше) в той же степени, что и остальной спектр [7], то помехи, в основном возникающие в этом диапазоне, будут вносить большое влияние на конечный сигнал.

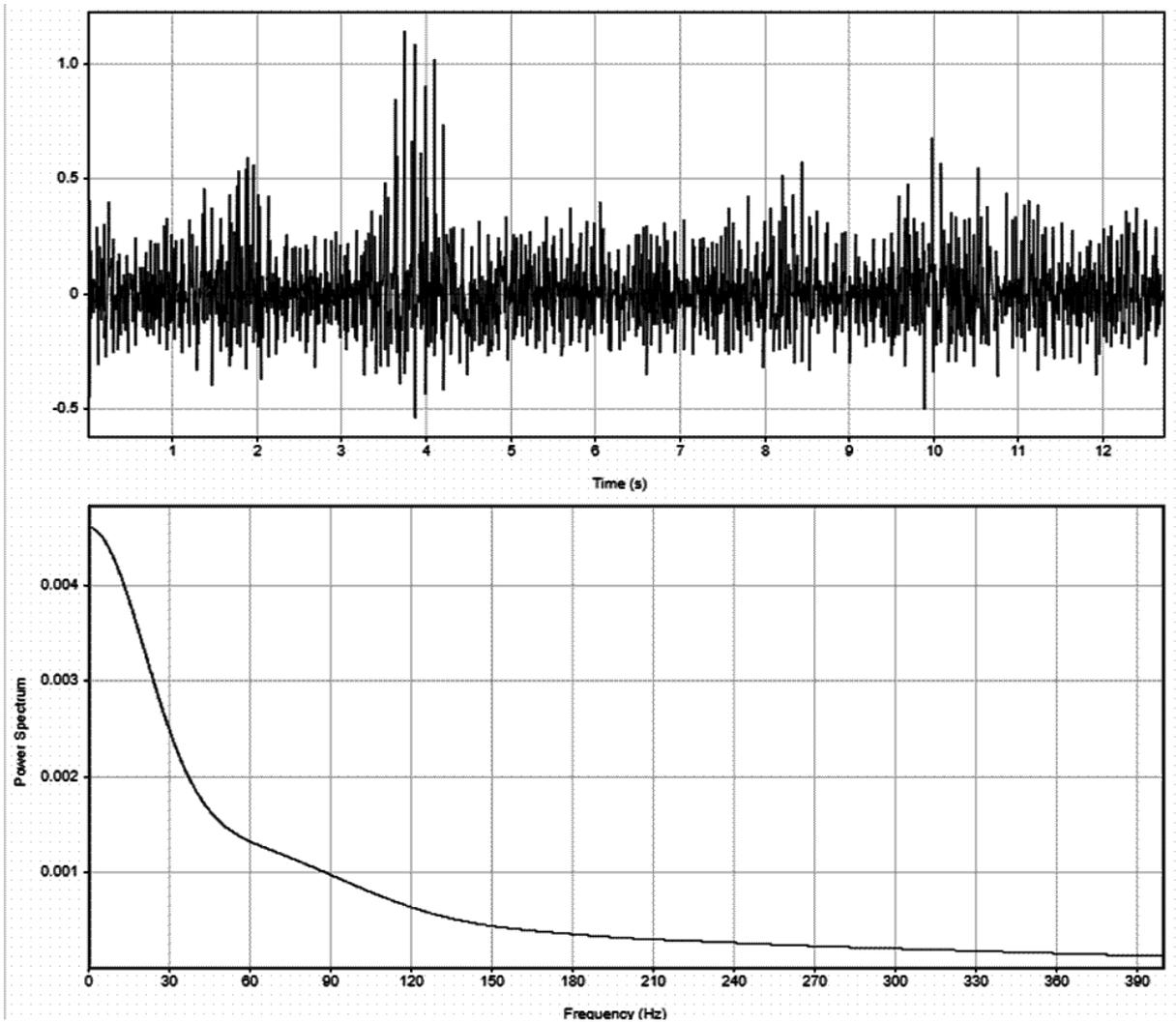


Рис. 1. Исходный сигнал электрической активности мышцы и его спектральная плотность

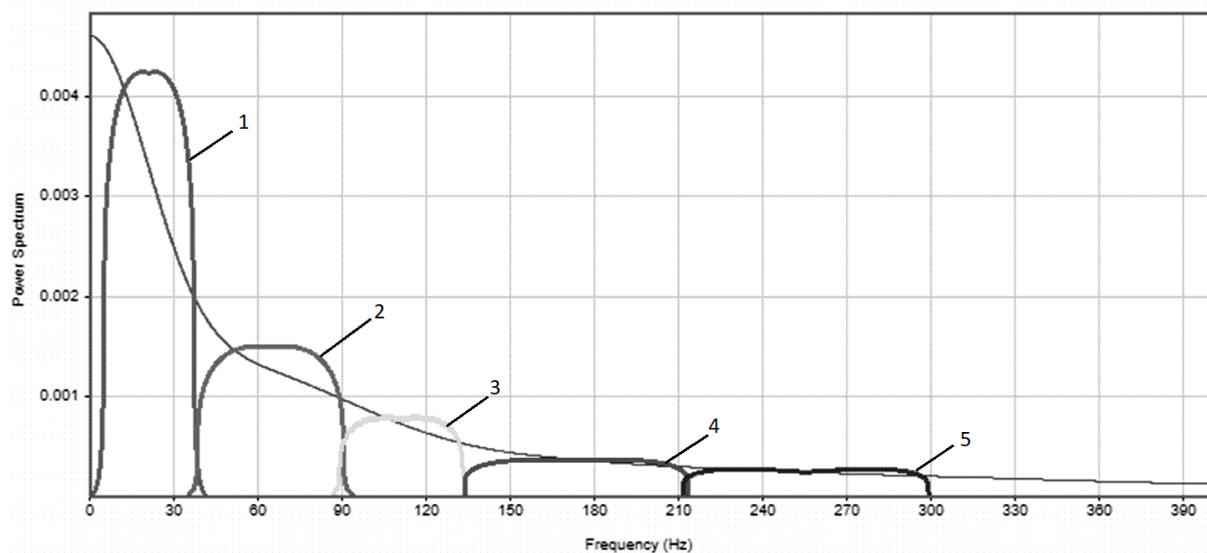


Рис. 2. Разделение частотного диапазона на зоны с разной степенью ослабления сигнала:
 1 – < 30 Гц; 2 – 30–90 Гц; 3 – 90–130 Гц; 4 – 130–210 Гц; 5 – > 300 Гц

Для ограничения частоты одной зоны были использованы полосовые фильтры, рассчитанные под диапазон каждой зоны. Затем выход каждого фильтра был скорректирован, ослаблен или уси-

лен в соответствии с зоной, в которой он работает. Из полученного значения каждого фильтра было рассчитано абсолютное значение, используемое для дальнейшей обработки (рис. 3).

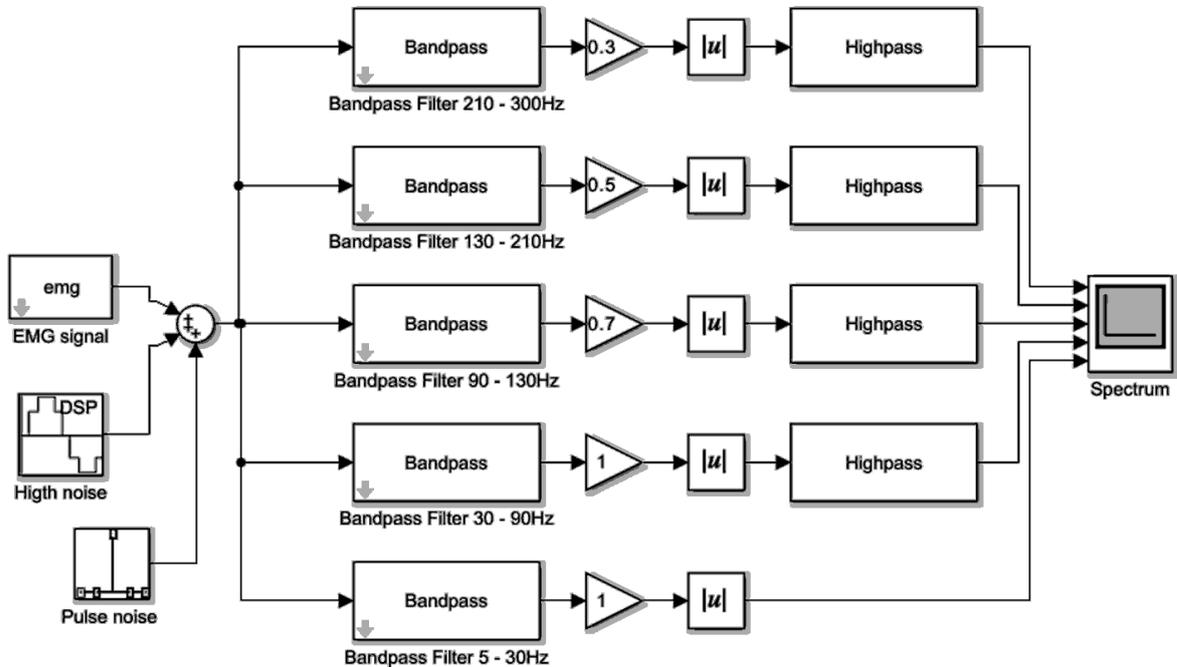


Рис. 3. Обработка биоэлектрического сигнала по частотным зонам

Результаты симуляции (рис. 4) в отсутствие внешних помех демонстрируют частотный выходной сигнал, соответствующий вышеуказанным характеристикам с незначительными

колебаниями, из-за неравномерности усиления, прикладываемого в момент записи исходной миограммы.

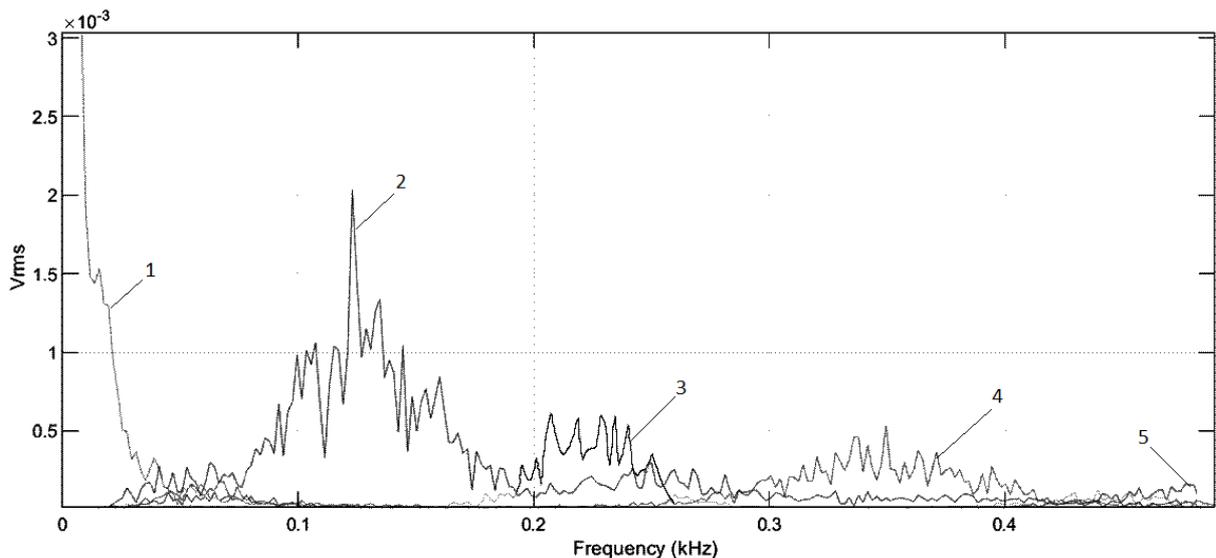


Рис. 4. Чистый выходной сигнал, распределенный на частотные зоны с коэффициентами ослабления: 1 – < 30 Гц; 2 – 30–90 Гц; 3 – 90–130 Гц; 4 – 130–210 Гц; 5 – > 300 Гц

Далее в исходный сигнал были добавлены сигналы, имитирующие внешние помехи: высокочастотный шум, соответствующий наведенному сигналу от импульсных преобразова-

телей, и импульсные помехи низкой частоты, имитирующие синфазную составляющую при перемещении измерительного электрода.

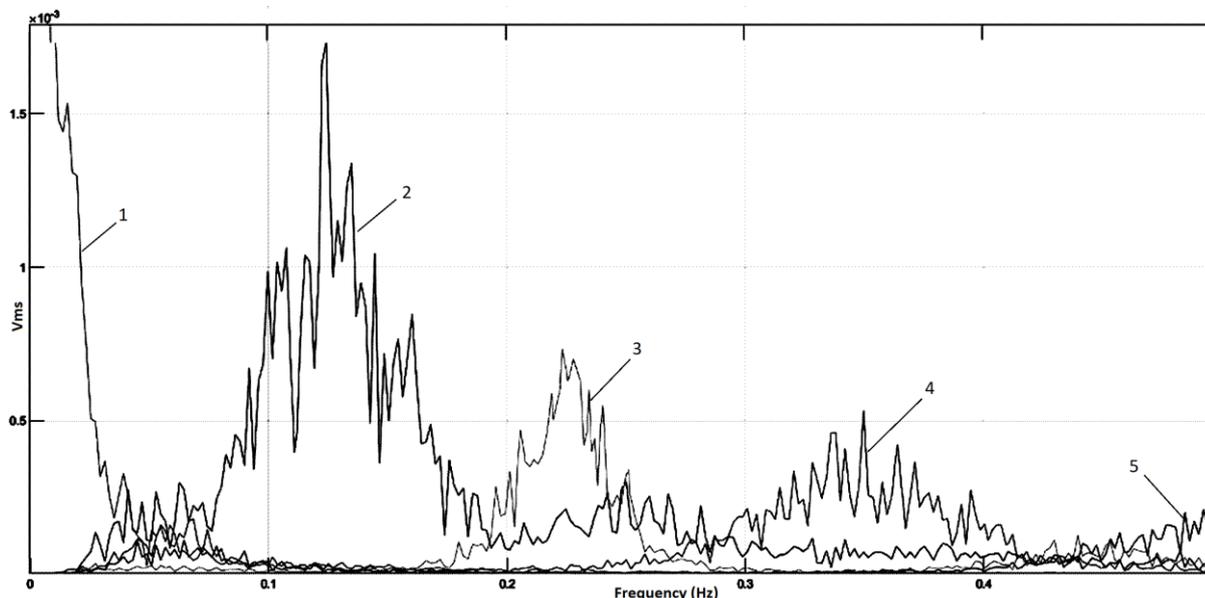


Рис. 5. Выходной сигнал при воздействии на исходный сигнал разнородных помех:
1 – < 30 Гц; 2 – 30–90 Гц; 3 – 90–130 Гц; 4 – 130–210 Гц; 5 – > 300 Гц

На результирующем графике (рис. 5) для наглядности была увеличена вертикальная развертка, заметны незначительные отклонения в зоне 130–210 Гц, связанные с захватом зоны низкочастотных помех, однако негативное влияние этого было уменьшено соответственно с коэффициентом работы зоны (0,5). Наиболее же эффективно система показывает себя в области высокочастотных помех; влияния на результирующий график наведенный сигнал преобразователя не оказал.

Выводы

Выявлено, что использование алгоритма анализа спектральной мощности исходного сигнала позволяет снизить влияния основных, разнородных помех на конечных сигнал. Показано, что наибольшее влияние вносят низкочастотные синфазные помехи, появляющиеся вследствие перемещения измерительного электрода. Для уменьшения их действия могут быть применены гелиевые электроды.

Полученный в результате работы алгоритм способствует повышению достоверности динамического измерения биопотенциала в мобильной системе управления активным экзоскелетом и является частью исследования по разработке алгоритма управления активным экзоскелетом ног [8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонова, А. В. Биомеханика мышц : Учебно-методическое пособие / А. В. Самсонова, Е. Н. Комиссарова ; под ред. А. В. Самсоновой. – СПб.: Изд-во СПбГУФК им. П. Ф. Лесгафта, 2008. – 127 с.
2. Крисвелл, Д. Э. Поверхностная электромиография // Государственный университет Сономы : Изд-во Jones and Bartlett Publishers, 2-е изд. – Садбери, Массачусетс, 2011 – 12 с.
3. Хьюсон, Д. Дж. Эволюция импеданса на границе электрод – кожа двух типов поверхностных ЭМГ-электродов во время длительных записей / Д. Дж. Хьюсон, Дж. Ю. Хокрел, Ж. Дюшен // Журнал электромиографии и кинезиологии. – 2003. – № 1. – С. 31.
4. Николаев, С. Г. Практикум по клинической электромиографии / С. Г. Николаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Иваново, 2003. – 64 с.
5. Физиотерапия : Учебное пособие / Г. Ш. Гафиятулина, В. П. Омельченко, Б. Е. Евтушенко, И. В. Черникова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 272 с.
6. Попов, Г. И. Биомеханика двигательной активности : Учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / Г. И. Попов, А. В. Самсонова. – М.: Академия, 2014. – 320 с.
7. Мошиц, Г. Проектирование активных фильтров : пер. с англ. / Г. Мошиц, П. Хорн. – М.: Мир, 1984. – 320 с.
8. Баталов, А. В. Регистрация и обработка сигнала биоэлектрической активности мышц для управления приводом бионического протеза / А. В. Баталов, О. В. Веселов // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 12, Часть 2. – С. 263–268.

УДК 004.896

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-20-26

*Т. Б. Бахов, С. А. Воротников***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ
ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ЧАСТИЦ СНЕГА В ЛИДАРНОМ ОБЛАКЕ ТОЧЕК****Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана**

tamerlan.baxov@mail.ru

В статье рассматривается использование синтетических данных из симулятора CARLA для обучения алгоритма фильтрации снега в облаке точек с лидара, используемого в качестве основного сенсора беспилотного автомобиля или автономного мобильного outdoor-робота.

Ключевые слова: беспилотный автомобиль, автономный мобильный outdoor-робот, компьютерное зрение, фильтрация облака точек, плохие погодные условия, лидар, симулятор.

*T. B. Bahov, S. A. Vorotnikov***UTILIZATION OF SYNTHETIC DATA
FOR SNOW PARTICLES FILTRATION IN A LIDAR POINT CLOUD****Bauman Moscow State Technical University**

The article discusses the use of synthetic data from the CARLA simulator to train an algorithm for snow filtration in a LIDAR point cloud used as the main sensor of a self-driving car or autonomous mobile outdoor robot.

Keywords: self-driving car, autonomous mobile outdoor robot, computer vision, pointcloud denoising, adverse weather conditions, LIDAR, CARLA simulator.

Введение

В настоящее время в мире активно развиваются методы и средства автономного движения автомобилей (*self-driving cars*) и мобильных роботов (*autonomous mobile outdoor robots*). Первые системы появились еще в 80-х годах XX века, но наиболее энергично такие работы стали проводиться с 2004 года, когда департамент американских военных исследований по продвинутым проектам обороны (*DARPA*) организовал первый *DARPA Grand Challenge*, междисциплинарное соревнование самоуправляемых автомобилей. Уже тогда команда из Стэнфордского университета [1], победившая в *DARPA Grand Challenge* 2005 года, использовала в своем решении методы машинного обучения, построения пути и одновременной локализации и построения карты (*SLAM – Simultaneous Localization and Mapping*), подходы, получившие широкое распространение и используемые в наши дни [2]. Конструкции датчиков для беспилотных автомобилей (*autonomous vehicles – AV*) за последние 20 лет претерпели значительные усовершенствования, однако самым лучшим и незаменимым по-прежнему является сканирующий лазерный дальномер – лидар (*lidar*).

Современный лидар – это сложное оптико-механическое устройство, включающее несколько десятков пар лазерных излучателей

и приемников, вращающихся вокруг вертикальной оси, что позволяет сканировать рабочее пространство в широком телесном угле и на большом расстоянии. Опыт эксплуатации лидара продемонстрировал, что наряду с замечательными показателями точности он подвержен влиянию атмосферных осадков, изменяющих оптические свойства среды распространения лазерного луча – дождя, тумана, снега. Помехи, вызванные этими факторами, существенно снижают точность работы лидара и ухудшают надежность *AV* в целом. Данная проблема особенно актуальна для России, где существует несколько климатических поясов с неустойчивой погодой в каждом из них.

В настоящее время ведутся исследования по повышению точности лидаров, работающих в условиях помех различной природы и повышения надежности построения карты. С этой целью в существующих методах машинного обучения анализируется использование различных алгоритмов фильтрации [3]. Однако ограниченное количество и качество датасетов существенно усложняет эффективность этих исследований. Создание же новых датасетов – трудоемкая задача, требующая подходящей погоды, проведения серии выездов и последующей монотонной разметки данных. Кроме того, лидары, установленные на различных *AV*, отли-

чаются друг от друга количеством лучей, их распределением, вертикальными углами обзора и паттернами сканирования. Поэтому для каждого из них требуется свой специфичный датасет, и в случае замены лидара в AV на другой, весь процесс нужно проходить с нуля.

Одним из возможных решений данной проблемы является использование симулятора и моделирование атмосферных осадков, например, снега в лидарном облаке точек.

В данной работе проверяется возможность использования искусственного датасета для обучения нейросетевого алгоритма фильтрации снега для его применения в реальных условиях.

Анализ предметной области

Использование синтетических данных для обучения нейронных сетей является широко распространенным методом в компьютерном зрении (*computer vision*) [4–6] и обучении с подкреплением (*reinforcement learning*) [7, 8] в ситуациях отсутствия датасета, трудоемкости его сбора и невозможности или опасности моделирования ряда ситуаций в реальной жизни.

Для создания искусственных датасетов активно применяются игровые движки *Unity* и *Unreal Engine* [9–11], специализированные симуляторы [12–14] и даже игры (как, например, *GTA V*) [15–17]. Однако учет атмосферных осадков, таких как туман, дождь или снег, требует более детального моделирования «физики работы» сенсоров, что обычно не закладывается в симуляторы. В текущей работе круг этих явлений будет сужен до падающего снега. В таком случае используют несколько вариантов решений.

Первый из них – использование открытых датасетов, записанных в снежную погоду [18–23]. Большая часть из них записана в Канаде или Северной части США [18, 20, 23]. В основном использовались 32-лучевые лидары [20–22], но есть и датасеты, содержащие также 64-лучевые [18, 21] и даже 128-лучевой [23] лидары. Однако каждый из них использует определенный тип сенсора, задающий геометрическое расположение лучей и получаемую карту, а сбор датасетов, как в [24] с использованием множества лидаров, будет кратно дороже.

Второй вариант связан с использованием алгоритмов моделирования снега в лидарном облаке точек. Впервые такой подход и его программная реализация для частиц снега были предложены в [34]. Исследователи в [35] дора-

ботали предложенный подход, улучшив моделирование физики процесса посредством более точного вычисления интенсивности и наложения отражений от различных частиц. Данный способ использовался для обучения [25]; в нем с помощью [35] был аугментирован снегом датасет *KITTI* [26] для получения *SnowyKITTI*.

И, наконец, третий вариант заключается в использовании алгоритмов адаптации предметной области (*domain adaptation*) [29, 30, 31]. Основа этих методов заключается в использовании архитектуры *GAN* [27] и ее вариаций. Авторы [29] были первыми, кто исследовал преобразование из симуляционных данных лидара в *CARLA* к синтетическим облакам точек в формате *KITTI* [26], используя фреймворк *CycleGAN* [28]. Аналогичным образом в работе [30] осуществили преобразование облаков точек между солнечными, дождливыми и туманными погодными условиями. Исследователи в [32] предложили модель, которая не только способна уменьшать снежный шум в облаке точек, но и искусственно синтезировать снежные точки для лидара. К сожалению, описанные подходы с трудом поддаются обобщению, поскольку данные, искаженные погодой, в целом, а не только размеченные данные, недопредставлены.

В данной работе рассматривается синтез алгоритма моделирования снега на основе «физики процесса» и искусственных данных, полученных в симуляторе.

Формирование датасета

Формирование искусственного датасета осуществлялось в два этапа. На первом этапе производилась запись данных в симуляторе, а на втором – их аугментация снегом с использованием алгоритма моделирования снега в облаке точек.

В качестве симулятора для записи датасета был выбран симулятор *CARLA* [14] – широко распространенный для работы с AV. *CARLA* имеет несколько различных сцен города и позволяет моделировать такие сенсоры, как лидар, камера, радар, *IMU*, *GNSS* и другие. В данной работе моделировался 64-лучевой лидар с равномерным распределением лучей в вертикальном диапазоне от -25° до 15° , вращающийся с частотой 20 Гц и установленный на высоте 2,4 м над землей.

Симулятор *CARLA* имеет 12 различных локаций. Часть из них закрыта для использования, а другая часть не подходит для записи датасета.

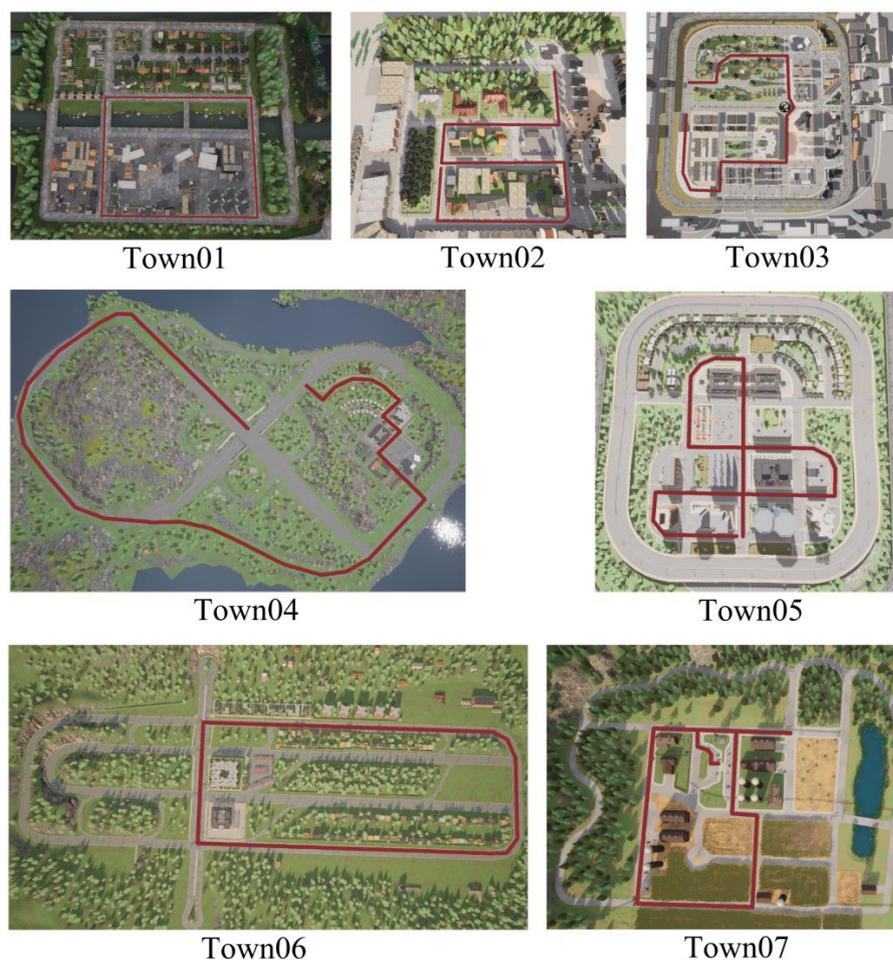


Рис. 1. Маршруты записи датасета в симуляторе CARLA в локациях 1–7

В данной работе были использованы 7 первых локаций. Автомобиль с установленным на нем лидаром ездил по маршрутам, указанным на рис. 1. Во время езды записывался *bag*-файл. Далее *bag*-файл считывался, и облака точек сохранялись как *numpy*-массив в бинарном файле.

Структура искусственного датасета формировалась по подобию датасета *WADS* [18]. Из сохраненных облаков было сформировано 20 сцен примерно по 100 облаков в каждой. Особенностью датасета является то, что в нем отсутствуют динамические объекты – другие автомобили и пешеходы.

После записи данных и их сохранения в нужной структуре облака точек аугментировались снегом. Для моделирования снега использовался алгоритм из [35]. Оригинальный алгоритм был рассчитан на лидар *Velodyne HDL-64E* и его поправки. Для использования в искусственном датасете поправки были модифицированы. Также были выбраны параметры снегопада, указанные в табл. 1. В результате был сформирован датасет из 20 сцен по ~100 облаков, запи-

санный в 7 разных локациях и аугментированный снегом.

Таблица 1

Параметры модели для аугментации облака точек частицами снега

Скорость снегопада, мм/ч	0,01
Конечная скорость, м/с	0,2
Плотность снега, г/см ³	0,01
Максимальный диаметр частиц, мм	1
Максимальный радиус видимости снега в лидаре, м	20

Обучение

В качестве нейросетевого алгоритма фильтрации был выбран *LiSnowNet* [33]. *LiSnowNet* отличается высокой скоростью работы (порядка 16 мс) и использованием незамеченных данных для обучения. В оригинальной статье он обучался на датасетах *CADCD* [20] и *WADS*. В текущей работе искусственный датасет был сформирован по структуре *WADS*. Обучение

производилось в течение 30 эпох. Датасет был разбит на обучающий и тестовый в соотношении (80/20) % соответственно. Размер батча составлял 8, скорость обучения (*learning rate*) – 0,001; затухание скорости (*learning rate decay*) – 0,89. Качество обучения и работы оценивалось на валидационной части датасета WADS.

Использованная в данной работе архитектура отличается от исходной. Облако точек в датасете WADS в формате дальностного изображения имеет размер 64x2048. Здесь размер входного облака составляет 64x900. Ввиду изменения размера входа были удалены четыре глубинных слоя – два для кодирования и два для декодирования, что упростило структуру сети. Также величина ошибки DWT (*Discrete Wavelet Transform* – дискретное вейвлет-преобразование) считается для меньшего количества итераций – поскольку ширина входного изображения нейросети кратна только 2².

Обучение производилось на современном ноутбуке с процессором *Intel Core i7-12700 H* и видеокартой *NVIDIA GeForce RTX 3070 Ti*. Процесс обучения отражен на рис. 2.

Обученная модель также была оценена на датасете WADS. Поскольку размер изображения в WADS составляет 64x2048, а в искусственном датасете он равен 64x900, то были проведены дополнительные операции для их сведения к одному размеру. Все манипуляции производились максимально равномерно, чтобы не вносить существенных искажений в результат. Сперва из исходного изображения облака был взят каждый второй угол по азимуту, что привело к получению размера 64x1024. Далее из него было удален каждый 10-й столбец, что привело к получению размера 64x910. На заключительном этапе был удален каждый 91-й, дав целевой размер 64x900.

Результаты работы сети, в том числе и на преобразованном датасете WADS, показаны в табл. 2.

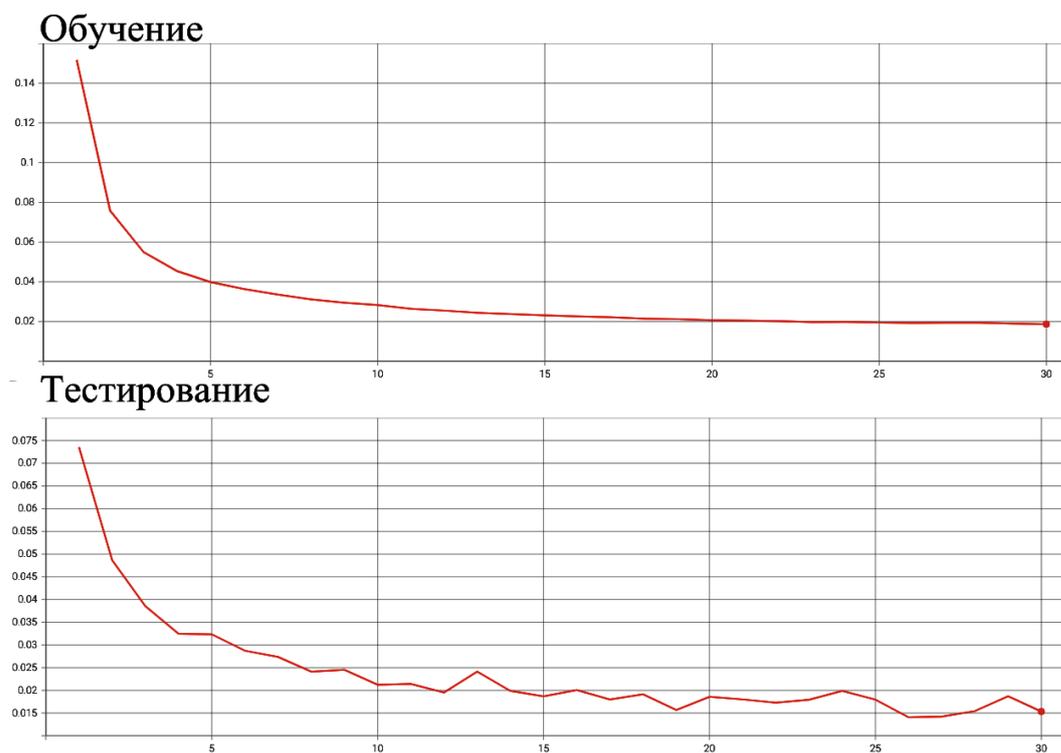


Рис. 2. Графики изменения ошибки (*loss*) в процессе обучения (сверху) и тестирования (снизу) сети *LiSnowNet*

Таблица 2

Сравнение моделей

Датасет*	Точность (<i>precision</i>)	Полнота (<i>recall</i>)	Время работы, мс
WADS/WADS	0.9249	0.9501	4.1328
CARLA/CARLA	1.0	0.7049	1.6467
CARLA/WADS	0.6265	0.9937	2.0244

* В числителе – датасет, на котором модель обучалась; в знаменателе – на котором тестировалась.

Как следует из табл. 2, сеть, обученная на искусственных данных, работает несколько хуже, чем на реальном датасете. В частности, точность снизилась на 30 %, а полнота стала выше на 5 %. Снижение точности говорит о том, что у сети увеличилось количество ложных срабатываний – она относит к снегу точки, которые им не являются. Повышенная полнота

отражает тот факт, что сеть очень хорошо обнаруживает частицы снега. Время работы сети, обученной на искусственном датасете, меньше, но это объясняется двумя факторами: 1) размер входного изображения меньше; 2) в сети меньше слоев.

Качественный результат работы сети показан на рис. 3 и 4.

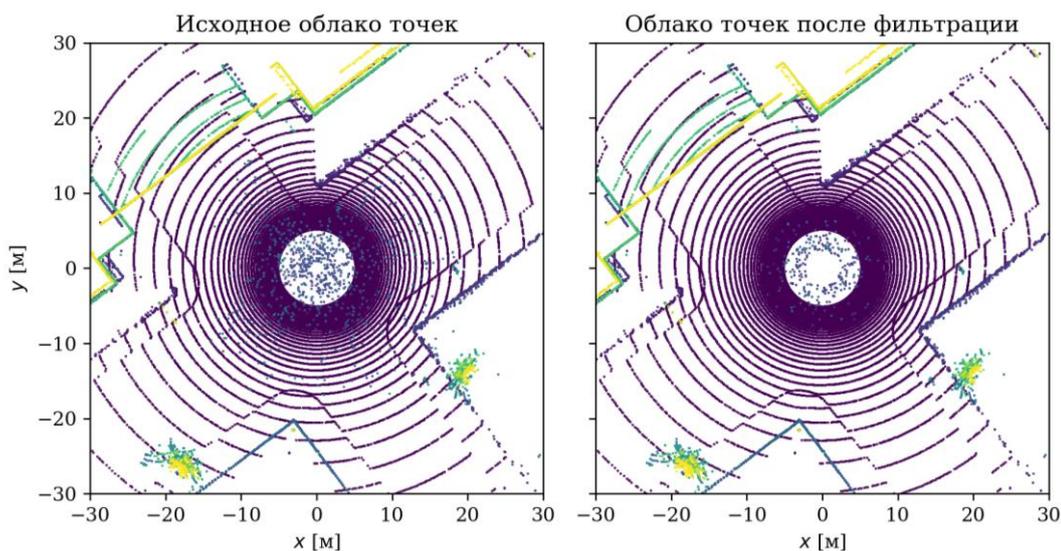


Рис. 3. Качественный результат работы сети *LiSnowNet* на облаке из искусственного датасета. Слева – исходное облако (вид сверху); справа – после фильтрации

Рис. 3 отражает работу сети на искусственном датасете, а рис. 4 – на датасете *WADS*.

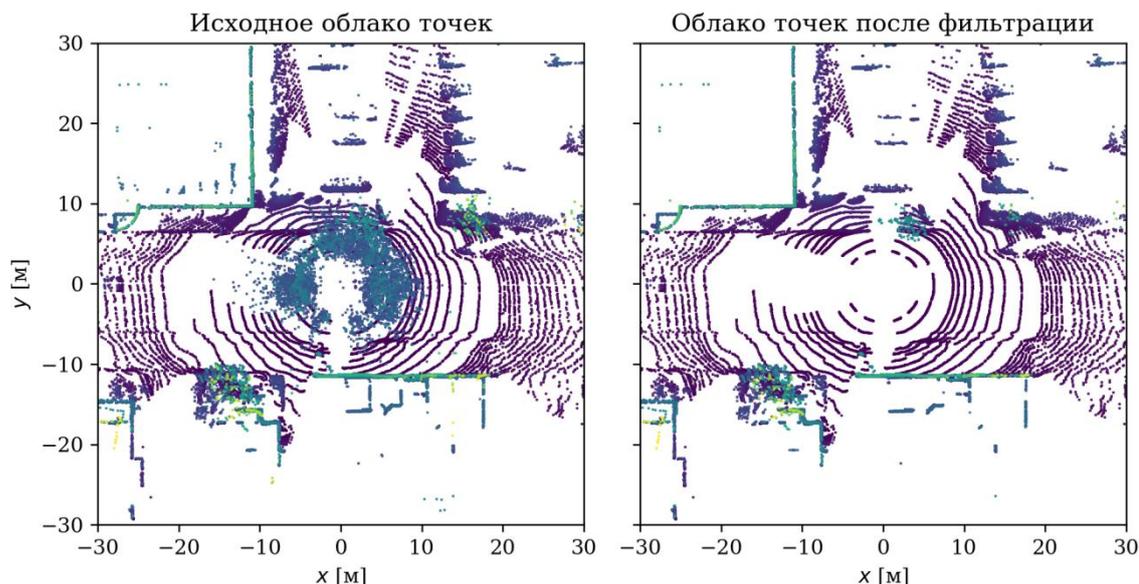


Рис. 4. Качественный результат работы сети *LiSnowNet*, обученной на искусственном датасете, на облаке из *WADS*. Слева – исходное облако (вид сверху); справа – после фильтрации

По рисункам можно заметить, что распределения лучей у лидаров значительно отличаются. Также стоит обратить внимание, что ин-

тенсивность снега в *WADS* намного выше. Тем не менее визуально сеть отфильтровала все частицы снега несмотря на различия.

Заключение

В данной работе было проведено исследование возможности использования синтетического датасета для обучения модели фильтрации частиц снега в лидарном облаке точек с последующей валидацией результата.

Получившиеся качественные и количественные результаты свидетельствуют о том, что подобный подход позволяет получить модель, выполняющую свои функции. Однако при его использовании наблюдается и некоторое снижение качества.

Отметим также, что было принято несколько допущений, которые могли повлиять на конечный результат. В дальнейшем для уточнения результата планируется использовать датасет с наличием динамических объектов и других участников движения, а также дополнить модель слоями вместо удаленных для более глубокого обучения.

Исследование и использование данного подхода позволит сократить время внедрения фильтров в реальные беспилотные системы при их создании или изменении конфигурации сенсоров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Thrun, S.* Stanley : The robot that won the DARPA Grand Challenge / S. Thrun et al. // Journal of field Robotics. – 2006. – Т. 23. – № 9. – С. 661–692.
2. *Debeunne, C.* A review of visual-LiDAR fusion based simultaneous localization and mapping / C. Debeunne, D. Vivet // Sensors. – 2020. – Т. 20. – № 7. – С. 2068.
3. *Cheng, Q.* Robust Lidar SLAM Under Adverse Weather : дис. – 2023.
4. *Nikolenko, S. I.* Synthetic data for deep learning // arXiv preprint arXiv:1909.11512. – 2019.
5. *Man, K.* A Review of Synthetic Image Data and Its Use in Computer Vision / K. Man, J. Chahl // Journal of Imaging. – 2022. – Т. 8. – № 11. – С. 310.
6. *Manettas, C.* Synthetic datasets for Deep Learning in computer-vision assisted tasks in manufacturing / C. Manettas, N. Nikolakis, K. Alexopoulos // Procedia CIRP. – 2021. – Т. 103. – С. 237–242.
7. *Osiński, B.* Simulation-based reinforcement learning for real-world autonomous driving / B. Osiński et al. // 2020 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). – IEEE, 2020. – С. 6411–6418.
8. *Kim, D.* Digital twin for autonomous collaborative robot by using synthetic data and reinforcement learning / D. Kim, M. Choi, J. Um // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2024. – Т. 85. – С. 102632.
9. *Gaidon, A.* Virtual worlds as proxy for multi-object tracking analysis / A. Gaidon et al. // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – С. 4340–4349.
10. *Ros, G.* The synthia dataset : A large collection of synthetic images for semantic segmentation of urban scenes / G. Ros et al. // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – С. 3234–3243.
11. *Saleh, F. S.* Effective use of synthetic data for urban scene semantic segmentation / F. S. Saleh et al. // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). – 2018. – С. 84–100.
12. *Lai, K. T.* Vivid : Virtual environment for visual deep learning / K. T. Lai et al. // Proceedings of the 26th ACM international conference on Multimedia. – 2018. – С. 1356–1359.
13. *Shah, S.* Airsim : High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles / Shah S. et al. // Field and Service Robotics: Results of the 11th International Conference. – Springer International Publishing, 2018. – С. 621–635.
14. *Dosovitskiy, A.* CARLA : An open urban driving simulator / A. Dosovitskiy et al. // Conference on robot learning. – PMLR, 2017. – С. 1–16.
15. *Richter, S. R.* Playing for benchmarks / S. R. Richter, Z. Hayder, V. Koltun // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. – 2017. – С. 2213–2222.
16. *Richter, S. R.* Playing for data : Ground truth from computer games / S. R. Richter et al. // Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11–14, 2016, Proceedings, Part II 14. – Springer International Publishing, 2016. – С. 102–118.
17. *Hurl, B.* Precise synthetic image and lidar (presil) dataset for autonomous vehicle perception / B. Hurl, K. Czarnecki, S. Waslander // 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – IEEE, 2019. – С. 2522–2529.
18. *Kurup, A. & Bos, J.* (2021). The Winter Adverse Driving dataSet (WADS). Retrieved from: <https://digitalcommons.mtu.edu/wads/>
19. *Kurup, A.* Dsor : A scalable statistical filter for removing falling snow from lidar point clouds in severe winter weather / A. Kurup, J. Bos // arXiv preprint arXiv:2109.07078. – 2021.
20. *Pitropov, M.* Canadian adverse driving conditions dataset / M. Pitropov et al. // The International Journal of Robotics Research. – 2021. – Т. 40. – № 4–5. – С. 681–690.
21. *Bijelic, M.* Seeing through fog without seeing fog : Deep multimodal sensor fusion in unseen adverse weather / M. Bijelic et al. // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2020. – С. 11682–11692.
22. *Sheeny, M.* RADIATE: A Radar Dataset for Automotive Perception / M. Sheeny et al. // arXiv preprint arXiv:2010.09076. – 2020.
23. *Burnett K. et al.* Boreas: A Multi-Season Autonomous Driving Dataset.
24. *Carballo, A.* LIBRE : The multiple 3D LiDAR dataset / A. Carballo et al. // 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – IEEE, 2020. – С. 1094–1101.
25. *Seppänen, A.* 4denoisenet : Adverse weather denoising from adjacent point clouds / A. Seppänen, R. Ojala, K. Tammi // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2022. – Т. 8. – № 1. – С. 456–463.
26. *Geiger, A.* Vision meets robotics : The kitti dataset / A. Geiger et al. // The International Journal of Robotics Research. – 2013. – Т. 32. – № 11. – С. 1231–1237.
27. *Goodfellow, I.* Generative adversarial nets / I. Goodfellow et al. // Advances in neural information processing systems. – 2014. – Т. 27.
28. *Zhu, J. Y.* Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks / J. Y. Zhu et al. // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – С. 2223–2232.

29. Sallab, A. E. LiDAR Sensor modeling and Data augmentation with GANs for Autonomous driving / A. E. Sallab et al. // arXiv preprint arXiv:1905.07290. – 2019.
30. Lee, J. Gan-based lidar translation between sunny and adverse weather for autonomous driving and driving simulation / J. Lee et al. // Sensors. – 2022. – Т. 22. – № 14. – С. 5287.
31. Chen, Z. Revisiting Domain-Adaptive 3D Object Detection by Reliable, Diverse and Class-balanced Pseudo-Labeling / Z. Chen et al. // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2023. – С. 3714–3726.
32. Zhang, Y. L-DIG : A GAN-Based Method for LiDAR Point Cloud Processing under Snow Driving Conditions / Y. Zhang et al. // Sensors. – 2023. – Т. 23. – № 21. – С. 8660.
33. Yu, M. Y. LiSnowNet : Real-time Snow Removal for LiDAR Point Clouds / M. Y. Yu, R. Vasudevan, M. Johnson-Roberson // 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2022. – С. 6820–6826.
34. Kilic, V. Lidar light scattering augmentation (lisa): Physics-based simulation of adverse weather conditions for 3d object detection / V. Kilic et al. // arXiv preprint arXiv:2107.07004. – 2021.
35. Hahner, M. Lidar snowfall simulation for robust 3d object detection / M. Hahner et al. // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2022. – С. 16364–16374.

УДК681.51

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-26-31

С. О. Безусов

**О ДВИЖЕНИИ ГРУППЫ
КИНЕМАТИЧЕСКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СВЯЗАННЫХ РОБОТОВ**

Волгоградский государственный технический университет

seleron@list.ru

Рассматривается задача кинематики движения по плоскости последовательно связанных роботов. Связи между роботами моделируются стержнями с переменной управляемой длиной и ориентацией относительно корпуса. Сформулированы условия следования последовательно связанных роботов по одной и той же траектории, основанные на введении отклоняющегося аргумента.

Ключевые слова: робот, связь, отклоняющийся аргумент.

S. O. Bezusov

**ON THE MOTION OF A GROUP
OF KINEMATICALLY SEQUENTIALLY CONNECTED ROBOTS**

Volgograd State Technical University

The problem of kinematics of movement along a plane of sequentially connected robots is considered. The constraints between the robots are modeled by rods with variable controllable length and orientation relative to the body. The conditions for the succession of sequentially linked robots along the same trajectory based on the introduction of a deviating argument are formulated.

Keywords: robot, constraint, divergent argument.

Введение

Под кинематически последовательно связанными роботами понимается такая робототехническая система, в которой каждый робот связан с предшествующим и последующим роботами системой стержней с переменной управляемой длиной и ориентацией относительно корпуса. Исключением являются первый (ведущий) и последний (замыкающий) роботы, у которых такая связь имеется только с последующим и предыдущим роботами соответственно.

Простейшими примерами данных систем

являются сочлененные автопоезда, многосекционный электротранспорт и др. [1, 2].

Обобщенный фрагмент подобных сочлененных представлен на рис. 1.

Рассматриваемая на рис. 1 кинематическая схема, в общем случае, предполагает функционирование четырех управляемых приводов. Но таких приводов может быть и меньше. Так, например, при фиксированных $l_1 = \text{const}$; $l_2 = \text{const}$ и $\varepsilon_2 = 0$ (что равносильно отсутствию соответствующих приводов), расчетная схема изменится (рис. 2).

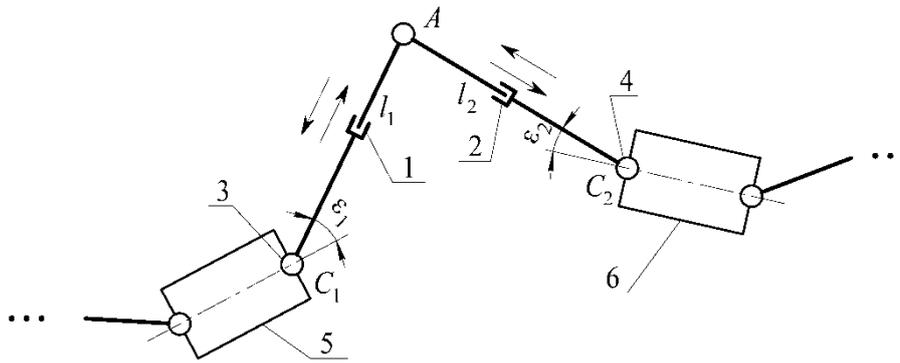


Рис. 1. Схема сочлененных роботов:

1 – привод изменения длины l_1 тяговых рычагов AC_1 ; 2 – привод изменения длины l_2 тяговых рычагов AC_2 ; 3 – привод изменения угла ϵ_1 ; 4 – привод изменения угла ϵ_2 ; 5, 6 – роботы; A – шарнир, соединяющий рычаги приводов 1 и 2; AC_1 , AC_2 – тяговые рычаги, обеспечивающие связь между роботами 5 и 6

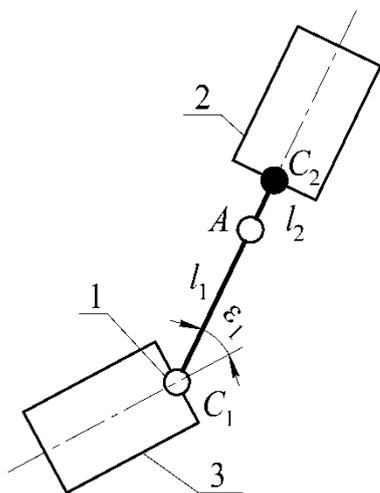


Рис. 2. Схема движения двух роботов:

1 – привод изменения угла ϵ_1 ; 2 – ведомый робот; 3 – ведущий робот; A – шарнир, соединяющий рычаги роботов 2 и 3; AC_1 , AC_2 – тяговые рычаги длины l_1 , l_2 , обеспечивающие связь между роботами 2 и 3

Шарнир A может быть как с управляемым приводом ориентации (управление углом ϵ_2), так и без него (свободное, неуправляемое сочленение).

При отсутствии управления ориентацией рычагов AC_1 и AC_2 схема сочленения принимает вид, характерный для известных схем прицепов транспортных средств [3, 4].

Ниже в таблице условно представлены некоторые возможные варианты управления приводами двух последовательно связанных роботов. Первой строчке соответствует обобщенная схема, представленная на рис. 1; вторая строчка характеризует кинематическую схему, представленную на рис. 2.

Некоторые из вариантов систем управления приводами

Номер варианта	Управляемые геометрические параметры			
	l_1	l_2	ϵ_1	ϵ_2
1	+	+	+	+
2	•	•	•	○
3	•	•	+	+

«+» – управляемый привод; «•» – положение привода зафиксировано; «○» – привод отсутствует (свободное сочленение)

Так как каждый из четырех приводов может находиться в двух рабочих состояниях (управляемом и фиксированном) и в состоянии полного отсутствия управления, то количество различных комбинаций S сочленений пары роботов равно $3^4 = 81$.

В общем случае каждый из роботов может иметь движители, приводимые в движение общим или независимыми двигателями. Какие-то роботы могут и не иметь движителей, обеспечивающих тяговые усилия, а вместо них иметь пассивные опорные элементы, взаимодействующие с поверхностью (например, свободно вращающиеся колеса). Перемещение подобных роботов обеспечивается связями с последующим или предыдущим роботами.

Изучается такое движение группы роботов, при котором каждый последующий робот повторяет движение предыдущего через промежуток времени τ [5].

Тогда законы движения двух роботов примут следующий вид:

$$\begin{cases} x_{j+1}(t) = x_j(t - \tau), \\ y_{j+1}(t) = y_j(t - \tau), \\ \varphi_{j+1}(t) = \varphi_j(t - \tau). \end{cases} \quad (1)$$

Такой режим движения характерен для кильватерного строя кораблей, близок к движению составных поездов по рельсам и др. Реализация подобного режима движения особенно актуальна для обеспечения движения автопоездов, где без дополнительного управления связями невозможно обеспечить требуемые параметры движения на криволинейных участках дорожного полотна.

Выбор варианта управления может зависеть от требований по габаритам, усилиям, сложности конструкции и так далее, поэтому следует рассматривать и сравнивать между собой раз-

личные схемы. Также необходимо рассмотреть несколько наиболее типичных схем управления.

Постановка задачи

В качестве подвижных робототехнических средств выбраны два робота типа «Ортоног», имеющие близкую к идеальной маневренность [6, 7]. Это позволяет не накладывать ограничения на любое возможное плоское движение каждого из роботов.

Движение роботов описывается движением центров их масс и углом поворота строительных осей относительно оси OX (рис. 3).

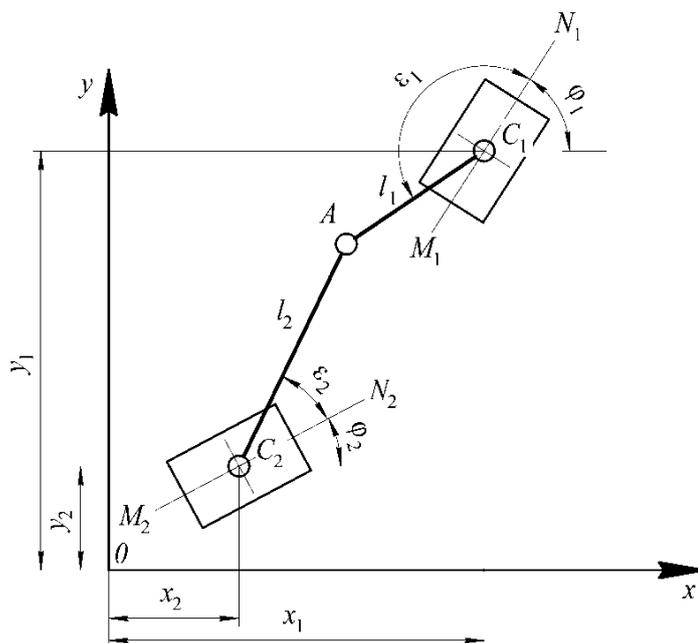


Рис. 3. Схема движения двух роботов:

A – шарнир, соединяющий тяговые рычаги; C_1, C_2 – центры масс роботов 1 и 2; AC_1, AC_2 – тяговые рычаги, обеспечивающие связь между роботами 1 и 2; l_1, l_2 – длины тяговых рычагов; M_1N_1, M_2N_2 – строительные оси роботов 1 и 2; x_1, x_2 – координаты центров масс роботов 1 и 2 по оси OX ; y_1, y_2 – координаты центров масс робота 1 и 2 по оси OY ; ϕ_1, ϕ_2 – углы поворота строительных осей роботов 1 и 2 относительно оси OX ; ϵ_1, ϵ_2 – углы поворота тяговых рычагов относительно строительных осей роботов 1 и 2

За систему уравнений, описывающих плоское движение роботов, принимается система уравнений (1).

Метод решения

Разложив правые части системы уравнений (1) в ряд по степеням τ , получим:

$$x_1(t - \tau) = x_1(t) - \dot{x}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{x}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\dddot{x}_1(t)\tau^3 + \dots = x_1(t) + B(t; \tau),$$

$$y_1(t - \tau) = y_1(t) - \dot{y}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{y}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\dddot{y}_1(t)\tau^3 + \dots = y_1(t) + C(t; \tau),$$

$$\phi_1(t - \tau) = \phi_1(t) - \dot{\phi}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{\phi}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\dddot{\phi}_1(t)\tau^3 + \dots = \phi_1(t) + A(t; \tau),$$

где

$$A(t; \tau) = -\dot{\varphi}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{\varphi}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\ddot{\ddot{\varphi}}_1(t)\tau^3 + \dots,$$

$$B(t; \tau) = -\dot{x}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{x}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\ddot{\ddot{x}}_1(t)\tau^3 + \dots,$$

$$C(t; \tau) = -\dot{y}_1(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{y}_1(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\ddot{\ddot{y}}_1(t)\tau^3 + \dots$$

Исходя из постоянной длины тяговых рычагов l_1, l_2 , положение шарнира A определяется из системы уравнений:

$$\begin{cases} (x_A - x_1(t))^2 + (y_A - y_1(t))^2 = l_1^2, \\ (x_A - x_2(t))^2 + (y_A - y_2(t))^2 = l_2^2. \end{cases}$$

С учетом системы уравнений (1) получаем:

$$\begin{cases} (x_A - x_1(t))^2 + (y_A - y_1(t))^2 = l_1^2, \\ (x_A - x_1(t - \tau))^2 + (y_A - y_1(t - \tau))^2 = l_2^2. \end{cases} \quad (2)$$

Для второго варианта:

$$x_1(t) = t \cdot \cos(\varphi(t)), y_1(t) = t \cdot \sin(\varphi(t)), \varphi_1(t) = \frac{t \cdot \pi}{14}, \tau = 1,$$

$$l_1 = 1.5 \text{ м}, l_2 = 1 \text{ м}, \varphi_1(0) = \varphi_2(0) = 0.$$

Результаты решения уравнений (2) и (3) для двух рассматриваемых вариантов движения представлены на графиках (рис. 4–7).

Найденные координаты положения шарнира A (2) позволяют определить углы поворота тяговых рычагов:

$$\varepsilon_1 = \arccos\left(\frac{x_A - x_1(t)}{l_1}\right),$$

$$\varepsilon_2 = \arccos\left(\frac{x_A - x_2(t, \tau)}{l_2}\right). \quad (3)$$

Имитационное моделирование

При имитационном моделировании рассматриваются два варианта возможного движения роботов, комбинация управляемых и неуправляемых приводов которых соответствует третьей строке приведенной выше таблицы.

Для первого варианта заданы следующие условия:

$$x_1(t) = t, y_1(t) = \sin\left(\frac{t \cdot \pi}{5}\right), \varphi_1(t) = 0, \tau = 1,$$

$$l_1 = 0.8 \text{ м}, l_2 = 1.2 \text{ м}, \varphi_1(0) = \varphi_2(0) = 0.$$

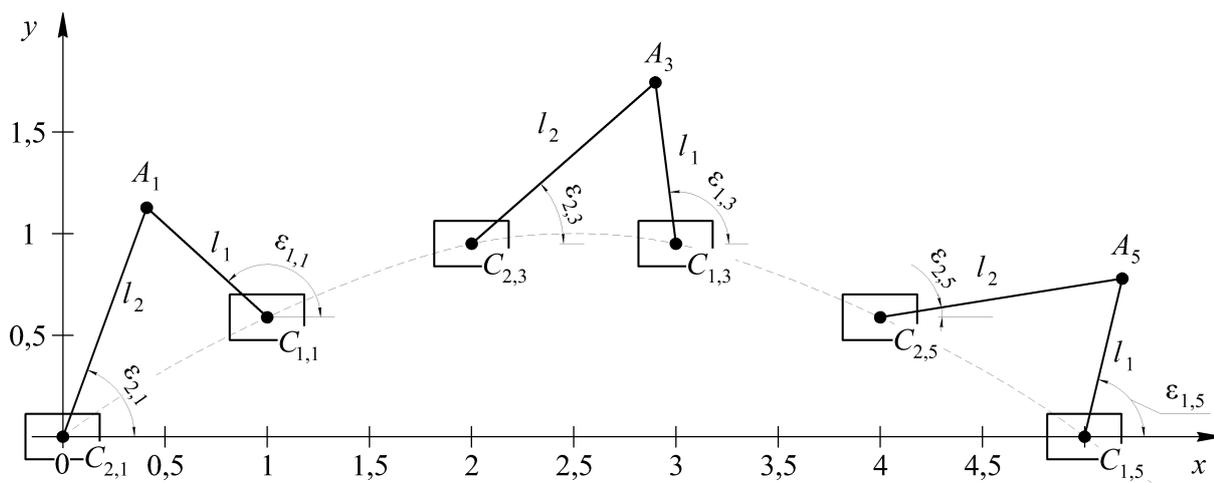


Рис. 4. Положение двух роботов, связанных тяговыми рычагами:

$C_{1,t}, C_{2,t}$ – центры масс роботов 1 и 2 в момент времени t ; $\varepsilon_{1,t}, \varepsilon_{2,t}$ – углы поворота рычагов в различные моменты времени t

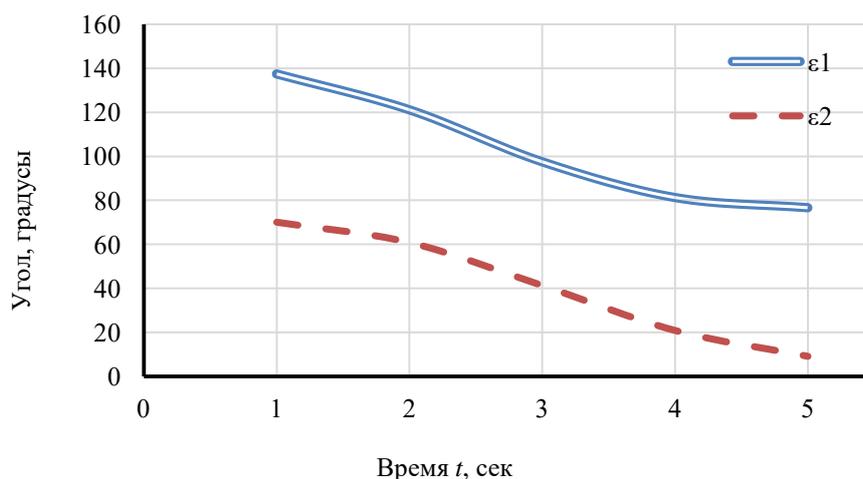


Рис. 5. Зависимость углов ε_1 , ε_2 от времени t :

ε_1 , ε_2 – углы поворота тяговых рычагов относительно строительных осей роботов 1 и 2

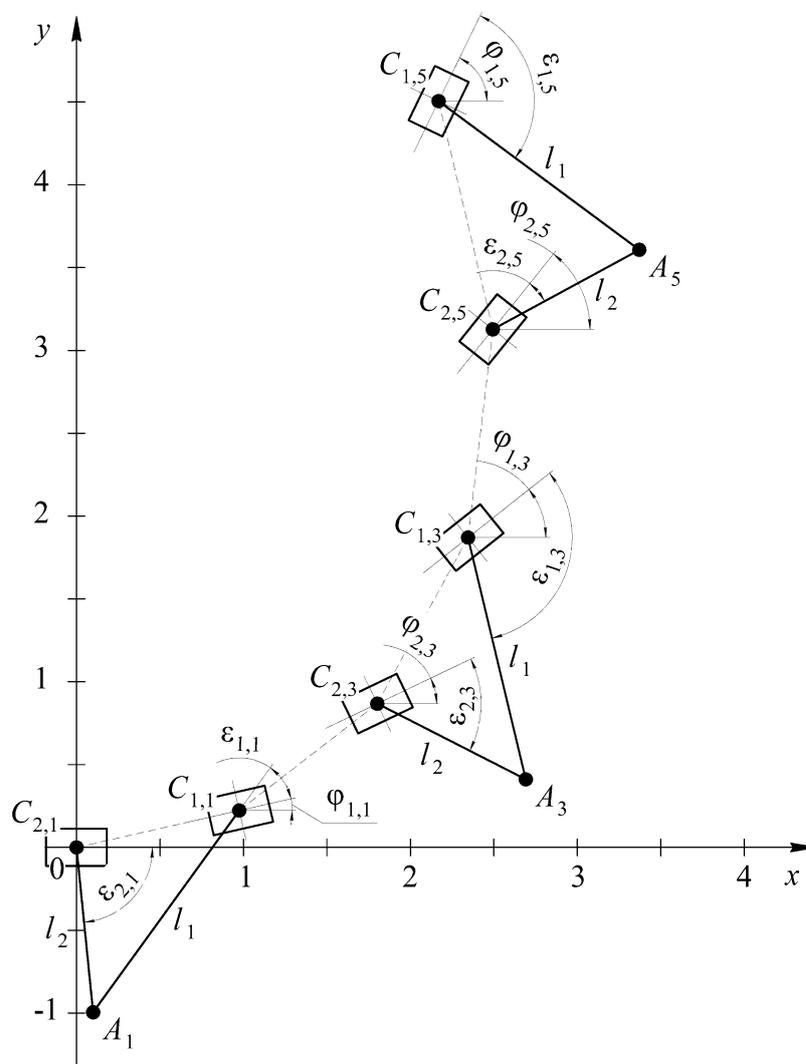


Рис. 6. Положение двух роботов, связанных тяговыми рычагами:
 $C_{1,t}$, $C_{2,t}$ – центры масс роботов 1 и 2 в момент времени t ; $\varepsilon_{1,t}$, $\varepsilon_{2,t}$ – углы поворота рычагов в различные моменты времени t ; $\varphi_{1,t}$, $\varphi_{2,t}$ – углы поворота строительных осей роботов относительно оси Ox в различные моменты времени t

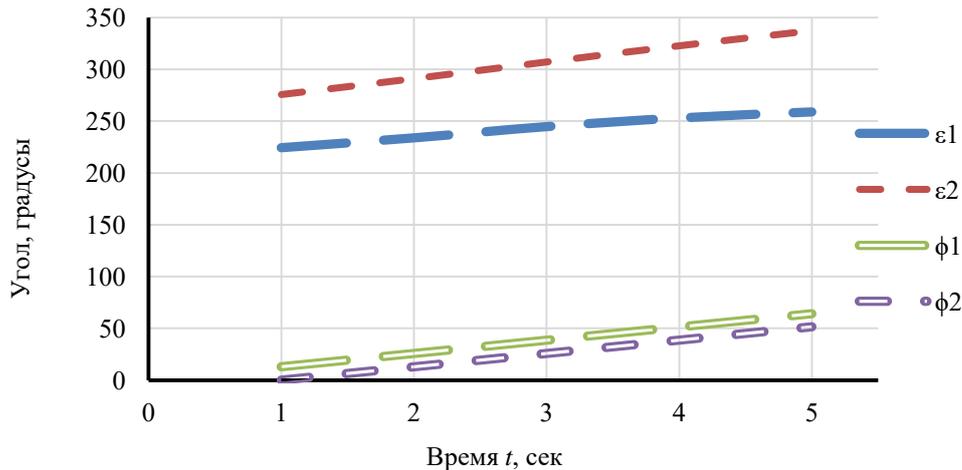


Рис. 7. Зависимость углов ε_1 , ε_2 и ϕ_1 , ϕ_2 от времени t :

ϕ_1 , ϕ_2 – углы поворота строительных осей роботов 1 и 2 относительно оси OX ;

ε_1 , ε_2 – углы поворота тяговых рычагов относительно строительных осей роботов 1 и 2

Заключение

Применен метод управления системами подвижных тел с помощью уравнений с отклоняющимся аргументом. Рассмотрено движение группы кинематически последовательно связанных роботов на примере задачи об управлении углами поворота тяговых рычагов, связывающих двух роботов при движении по плоскости.

Решение подобной задачи может быть применено в системах управления группой роботов, следующих по одинаковой траектории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Многоцелевые гусеничные и колесные машины : Конструкция / Г. И. Гладов, А. В. Вихров, В. В. Кувшинов, В. В. Павлов. – М. : Транспорт, 2001. – 272 с.
2. Раков, В. А. Локомотивы отечественных железных дорог (1956–1975 гг.) / В. А. Раков. – М. : Транспорт, 1999. – 443 с.

3. Горелов, В. А. Многозвенные автопоезда. Решение задач прямолинейной динамики с помощью имитационного моделирования : Учебное пособие / В. А. Горелов, Б. В. Падалкин, О. И. Чудаков. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 85 с.

4. Годжаев, З. А. Теория, разработка и конструкции малотоннажных автопоездов для народного хозяйства / З. А. Годжаев, И. В. Ковшов, В. А. Комочков. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2024 – 200 с.

5. Безусов, С. О. Об учете влияния связей с отклоняющимся аргументом на плоское движение сочлененных роботов / С. О. Безусов, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 12–17.

6. Брискин, Е. С. Реконфигурируемый транспортный комплекс со двояными шагающими движителями / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов, С. С. Фоменко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 24(127) ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 10–15.

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

УДК 629.1.02

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-32-35

*Д. В. Бордюгов***ОБ УПРАВЛЕНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
ЗА СЧЕТ СТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ ВНУТРЕННИХ МАСС
И НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГОЛОНОМНЫХ СВЯЗЕЙ*****Волгоградский государственный технический университет**

denklopuk@gmail.com

Рассматривается метод управления плоским движением робота с двумя внутренними массами, совершающими движение по окружности с постоянной скоростью вокруг вертикальной оси, основанный на наложении или снятии голономных связей на стойки, установленные на корпусе робота. В процессе перемещения поочередно одна из стоек вступает в контакт с поверхностью, в то время как другие с ней не взаимодействуют. Это позволяет корпусу робота проворачиваться вокруг неподвижной стойки.

Ключевые слова: робот, стойка, заклинивание, управление движением, внутренняя масса.

*D. V. Bordyugov***A MOBILE ROBOT MOTION CONTROL BASED ON STATIONARY MOTION
OF INTERNAL MASSES AND NON-STATIONARY HOLONOMIC LIAISONS****Volgograd State Technical University**

A method of controlling the planar motion of a robot with two internal masses moving in a circle with constant velocity around a vertical axis is considered, based on imposing or removing holonomic ties on the struts mounted on the robot body. During the movement process, alternately one of the struts comes into contact with the surface while the others do not interact with it. This allows the robot body to rotate around the stationary post.

Keywords: robot, support, jamming, motion control, internal mass.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили мобильные роботы с различными типами движителей [1–3]. Шагающие или «шагающеподобные» движители в сравнении с другими отличаются дискретным взаимодействием с опорной поверхностью, что предоставляет существенные преимущества в условиях неорганизованной среды [4]. Это позволяет рассматривать их в качестве механических систем, на которые накладываются голономные связи при взаимодействии с поверхностью, или снимаются при переносе опор в новое положение.

Голономной, или конечной связью называется такое условие, которое ограничивает положение рассматриваемой механической системы, понуждая ее координаты подчиняться уравнениям связей [5]. Путем объединения метода управления реакциями связей (одна из стоек робота находится в силовом, тяговом

взаимодействии с опорной поверхностью, а остальные с ней не взаимодействуют и не создают усилий) и управления перемещением внутренней массы [6, 7] возможно осуществить требуемое управление движением мобильного робота.

Постановка задачи

Рассматривается мобильный робот (рис. 1), состоящий из твердого тела (корпуса) 1, который опирается на горизонтально расположенную поверхность N шариковыми опорами 2. Конструкция робота включает в себя два внутренних тела 3, совершающих вращательное движение вокруг вертикальных осей O_1, O_2 . При помощи стоек 4, поочередно вступающих в контакт с опорной поверхностью, на движение робота накладываются голономные связи, или они снимаются, что позволяет ему совершать плоское движение.

© Бордюгов Д. В., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

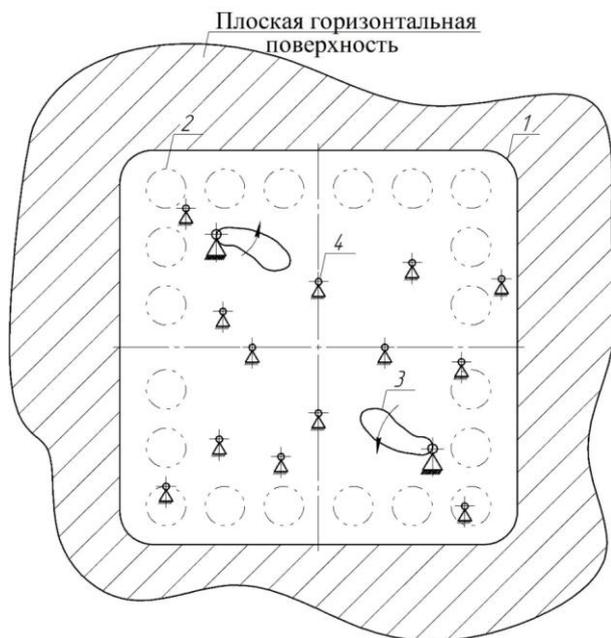


Рис. 1. Кинематическая схема

В процессе перемещения робота можно выделить несколько этапов; на каждом из них одна из стоек находится в опорной фазе, что позволяет корпусу проворачиваться вокруг вертикальной оси, проходящей через нее.

Ставится задача определения уравнений движения рассматриваемого мобильного робота при произвольном последовательном изменении взаимодействующих с опорной поверхностью стоек и получения траектории движения центра его корпуса.

Математическое моделирование

На рис. 2 представлена расчетная схема рассматриваемого робота. Количество управляемых приводов-стоек равно четырем, расположенных симметрично. Рассматривается установившийся режим движения двух внутренних масс $\omega_1 = \text{const}$, $\omega_2 = \text{const}$; момент, развиваемый двигателем не учитывается, в силу предположительного «медленного» движения корпуса робота.

$$\begin{aligned} \Phi_{x1} &= m_1 r \cdot \omega_1^2 \cdot \cos(\alpha_1 + \omega_1 t), & \Phi_{y1} &= m_1 r \cdot \omega_1^2 \cdot \sin(\alpha_1 + \omega_1 t), \\ \Phi_{x2} &= m_2 r \cdot \omega_2^2 \cdot \cos(\alpha_2 + \omega_2 t), & \Phi_{y2} &= m_2 r \cdot \omega_2^2 \cdot \sin(\alpha_2 + \omega_2 t). \end{aligned} \tag{2}$$

Имитационное моделирование

Параметры рассматриваемой механической системы:

$a = 0,20$ м; $b = 0,02$ м; $d = 0,02$ м; $r_1 = 0,09$ м; $r_2 = 0,10$ м; $m_1 = 1$ кг; $m_2 = 2,5$ кг; $\omega_1 = 0,5$ рад/с; $\omega_2 = 0,5$ рад/с; $\alpha_1 = 1,047$ рад; $\alpha_2 = 0,52$ рад.

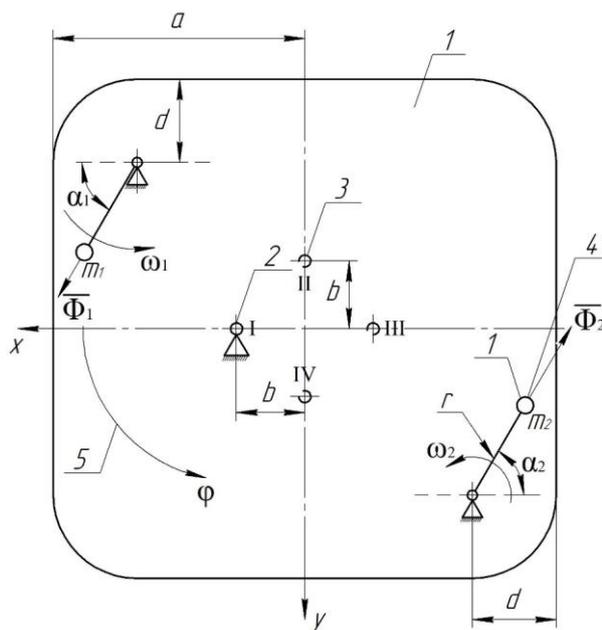


Рис. 2. Расчетная схема мобильного робота с подвижными внутренними массами:

Φ_1, Φ_2 – силы инерции; m_1, m_2 – массы грузов; r – длина стержня, на котором закреплен груз; b – расстояние от зафиксированной опоры до линии, проходящей через геометрический центр робота; α_1, α_2 – углы отклонения стержней относительно горизонтальной оси; ω_1, ω_2 – угловые скорости стержней с закрепленными на них грузами; φ – угол поворота корпуса; $\ddot{\varphi}$ – угловое ускорение корпуса робота.

1 – корпус мобильного робота; 2 – опора, взаимодействующая с поверхностью; 3 – опора в фазе свободного перемещения; 4 – вращающаяся масса; 5 – траектория движения геометрического центра корпуса робота

В предположении малости сил инерции, обусловленных непосредственно вращательным движением робота относительно неподвижной опоры, уравнение движения корпуса мобильного робота имеет вид:

$$J_a \ddot{\varphi} = M_1 + M_2; \tag{1}$$

$$J_a \ddot{\varphi} = \Phi_{x1} l_i + \Phi_{y1} l_j + \Phi_{x2} l_k + \Phi_{y2} l_q;$$

где J_a – момент инерции корпуса робота; M_1, M_2 – моменты сил Φ_1 и Φ_2 , действующие со стороны вращающихся грузов относительно неподвижной опоры; l_i, l_k, l_j, l_q – плечи сил $\Phi_{x1}, \Phi_{y1}, \Phi_{x2}, \Phi_{y2}$ соответственно,

Начальные условия: $\varphi = 0$ рад; $\dot{\varphi} = 0$ рад/с.

Смена стоек происходит в момент нулевого значения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi} = 0$ рад/с для предотвращения удара. На рис. 3 показан график изменения угловой скорости корпуса от времени.

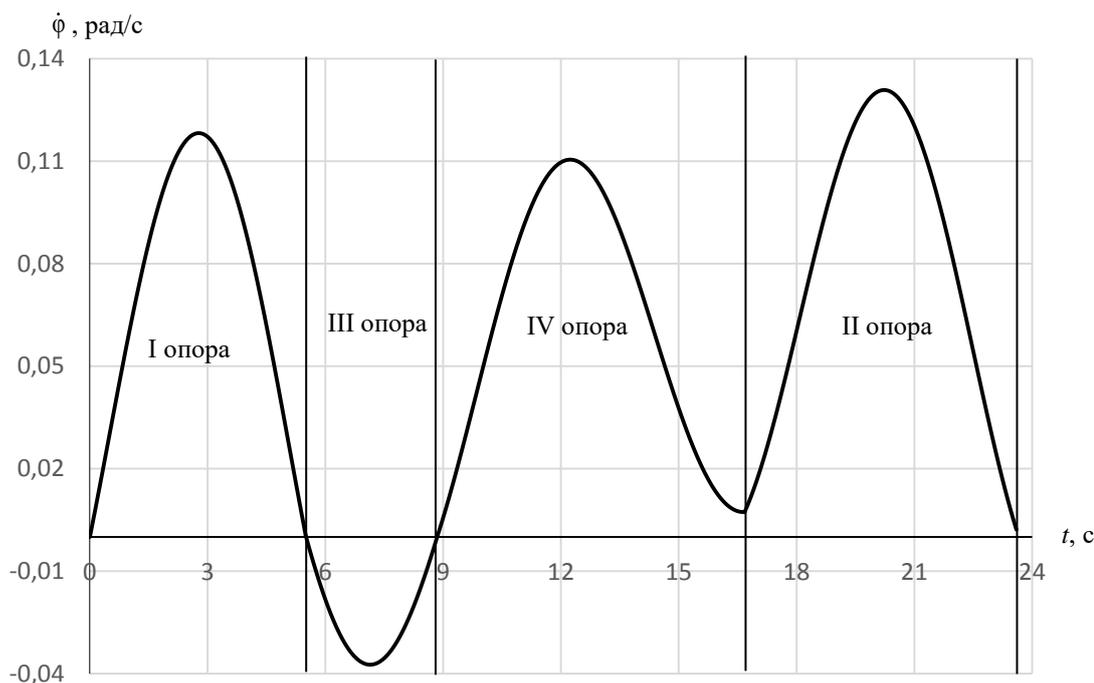


Рис. 3. Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi}$, рад/с от времени t , с.

Ниже в таблице представлены алгоритм управления стойками робота и значения угла поворота корпуса φ , рад.

Промежуток времени движения t , с	Угол поворота внутренней массы φ , град	Стойка, взаимодействующая с поверхностью
0 ... 5,50 с	0 ... 23,17 град	I опора
5,50 ... 8,86 с	23,17 ... 18,52 град	III опора
8,86 ... 16,68 с	18,52 ... 46,12 град	IV опора
16,68 ... 23,60 с	46,12 ... 76,98 град	II опора

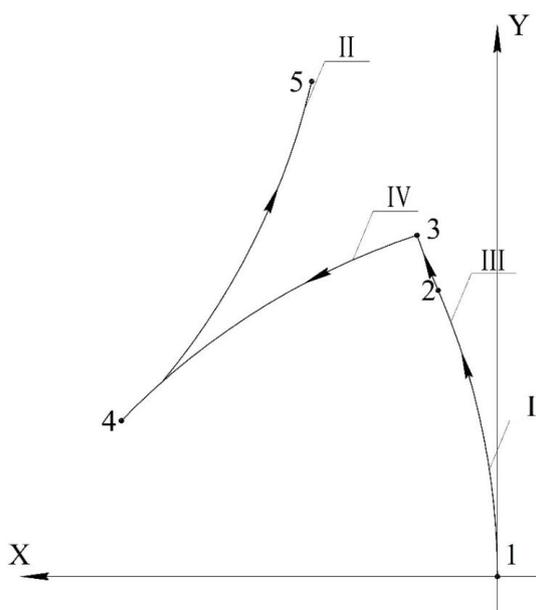


Рис. 4. Изменение положения центра корпуса мобильного робота

Полученные результаты подтверждают справедливость гипотезы малой скорости корпуса мобильного робота, вследствие чего не учитывается момент, развиваемый двигателем.

Траектория изменения положения геометрического центра корпуса мобильного робота изображена на рис. 4. В начальный момент времени корпус вращается против часовой стрелки, участок 1–2; в точке 2 его угловая скорость равна нулю, и происходит смена стойки, после чего корпус начинает вращаться против часовой стрелки, участок 2–3. Дальнейшее перемещение мобильного робота происходит аналогичным образом.

Заключение

Представлены уравнения движения мобильного робота с внутренними массами, совершающими вращательное движение, при произвольном последовательном изменении взаимодействующих с опорной поверхностью стоек.

Определены значения угла поворота корпуса робота, представленные выше в таблице, а также изменение его угловой скорости в процессе движения, рис. 3.

Получена траектория движения геометрического центра корпуса робота при заданном алгоритме смены стоек (рис. 4).

Полученные результаты позволяют ставить задачу о разработке алгоритма движения корпуса робота из начальной точки в конечную (заданную) с условиями минимума энергозатрат и времени движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Okhotsimsky, D. E. Walking machines / D. E. Okhotsimsky, A. K. Platonov, A. A. Kirilchenko [et al.] // Advances in Mechanics. – 1992. – Vol. 15. – No 1–2. – P. 39–70.
2. A Mobile Climbing Robot for High Precision Manufacture and Inspection of Aerostructures / T. S. White, R. Alexander, G. Callow, A. Cooke, S. Harris, J. Sargent // The International Journal of Robotics Research. – 2005. – Vol. 24. – Pp. 589–598.

3. Караваев, Ю. Л. Динамика сфероробота с внутренней омниколесной платформой / Ю. Л. Караваев, А. А. Килин // Нелинейная динамика. – 2015. – Т. 11. – № 1. – С. 187–204.

4. The investigation of walking machines with movers on the basis of cycle mechanisms of walking / E. S. Briskin, V. V. Chernyshev, A. V. Maloletov, V. V. Zhoga // 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2009, 09–12 августа 2009 года / sponsors: IEEE Robotics and Automation Society, Changchun University of Science and Technology, Kagawa University. – Changchun, 2009.

5. Журавлев, В. Ф. Понятие связи в аналитической механике / В. Ф. Журавлев // Нелинейная динамика. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 853–860.

6. Болотник, Н. Н. Оптимальное управление прямолинейным движением твердого тела по шероховатой плоскости посредством перемещения двух внутренних масс / Н. Н. Болотник, Т. Ю. Фигурин // Прикладная математика и механика. – 2008. – Т. 72. – № 2. – С. 216–229.

7. Акуленко, Л. Д. Управление движением неоднородного цилиндра с подвижными внутренними массами по горизонтальной плоскости / Л. Д. Акуленко, Н. Н. Болотник, С. А. Кумакшев, С. В. Нестеров // Прикладная математика и механика. – 2006. – Т. 70. – № 6. – С. 942–958.

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5
DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-35-40

А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ И СПОСОБЫ ИХ АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧ ОБХОДА СТАТИЧНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ

Волгоградский государственный технический университет

alexanderbs00@mail.ru, artkoshman@gmail.com, alex-leonard@yandex.ru, au@vstu.ru

В статье рассматривается вопрос классификации препятствий на основе учета относительного расположения средневзвешенной точки препятствия и разработки алгоритмов аппроксимации препятствий.

Ключевые слова: мобильный робот, метод искусственных потенциальных полей, компьютерное зрение, классификация препятствий, LIDAR.

A. S. Bykov, A. M. Koshman, A. V. Leonard, V. A. Shurygin

CLASSIFICATION OF OBSTACLES AND WAYS OF THEIR APPROXIMATION FOR TASKS OF BYPASSING STATIC OBSTACLES

Volgograd State Technical University

The article considers the issue of obstacle classification based on the relative location of the weighted average point of the obstacle and the development of an improved obstacle approximation algorithms.

Keywords: mobile robot, artificial potential field, computer vision, obstacle classification, LIDAR.

Введение

Для эффективного автоматического функционирования мобильных роботов в недетерминированной среде необходимы алгоритмы обработки данных о среде и их интерпретация. На сегодняшний день существуют различные сенсоры, позволяющие идентифицировать пре-

пятствия и определять их тип [1]. Многие алгоритмы распознавания препятствий используют данные, получаемые от видеокамер [2]. Известные алгоритмы классификации препятствий [3] разделяют препятствия по классам опасности для движения робота. С целью совершенствования алгоритмов обработки информации о сре-

де с использованием LIDAR-данных, предлагаются алгоритмы классификации препятствий по положению средневзвешенной точки и их аппроксимации для каждого из типов.

1. Классификация препятствий

Предлагается разделять статические препятствия на три основных типа:

1) выпуклые препятствия, $L_W > L_{Obst}$;

2) вогнутые препятствия, $L_W < L_{Obst}$;

3) плоские препятствия, $L_W \approx L_{Obst}$,

где L_W – расстояние между центром LIDAR и средневзвешенной точкой препятствия; L_{Obst} – расстояние между центром LIDAR и точкой на границе препятствия, лежащей на прямой, проходящей через центр LIDAR и средневзвешенную точку (рис. 1).

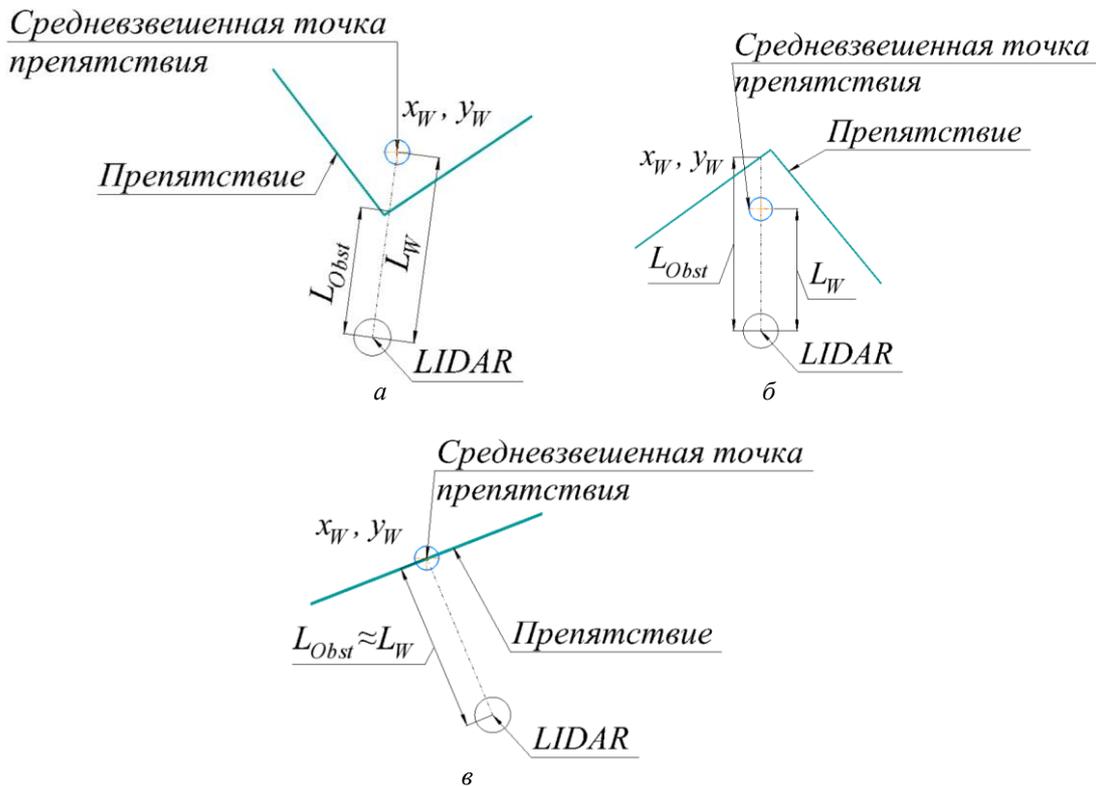


Рис. 1. Типы препятствий:

a – выпуклое препятствие; *б* – вогнутое препятствие; *в* – плоское препятствие

2. Средневзвешенная точка препятствия

Для компенсации негативного влияния неучитенных точек границы препятствия (рис. 2)

в расчет координат (x_w, y_w) средневзвешенной точки вводится весовая функция.

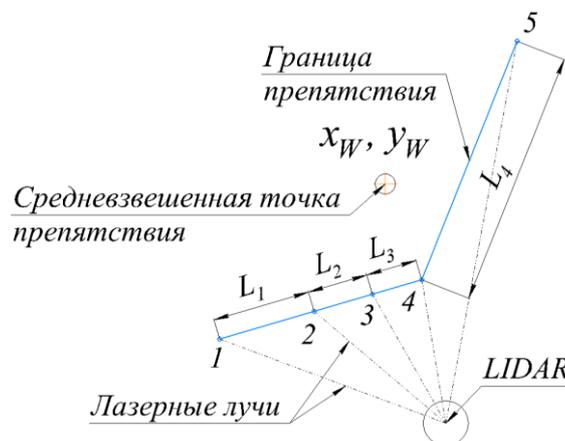


Рис. 2. Схема для нахождения координат средневзвешенной точки

Средневзвешенные координаты вычисляются по формулам (4):

$$x_W = \frac{\sum_{i=1}^n [W(L_i) \cdot x_i]}{\sum_{i=1}^n [W(L_i)]}; y_W = \frac{\sum_{i=1}^n [W(L_i) \cdot y_i]}{\sum_{i=1}^n [W(L_i)]}, \quad (1)$$

где x_i и y_i – координаты текущей точки границы препятствия; n – общее количество точек;

$W = W(L_i)$ – весовая функция; L_i – расстояние между текущей и следующей точкой.

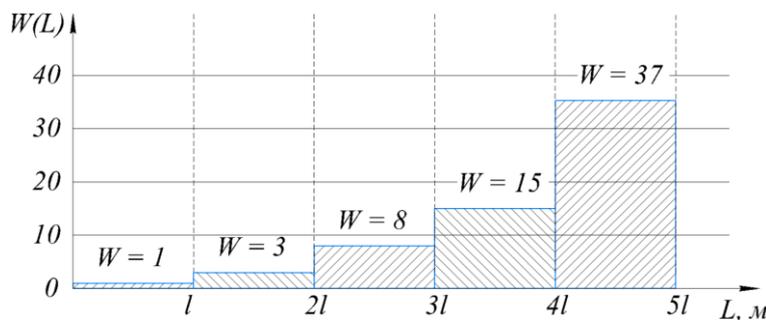


Рис. 3. Вид весовой функции $W(L_i)$

В первом приближении, функция W экспертно задается в виде ступенчатой функции с пятью уровнями значений (рис. 3) расстояния между соседними точками. Величина l вычисляется по формуле (2):

$$l = L_{crit} / 5, \quad (2)$$

где $L_{crit} = 2f \cdot R$ – критерий принадлежности точки препятствию; R – радиус описанной вокруг робота окружности; f – коэффициент безопасности, $f \geq 1$.

3. Выбор характерных точек для неплоских препятствий

Предлагается в качестве характерных точек использовать начальную точку (т. А), конечную точку (т. В) из массива точек, принадлежащих границе препятствия, и наиболее удаленную от отрезка АВ точку (т. С) (рис. 4).

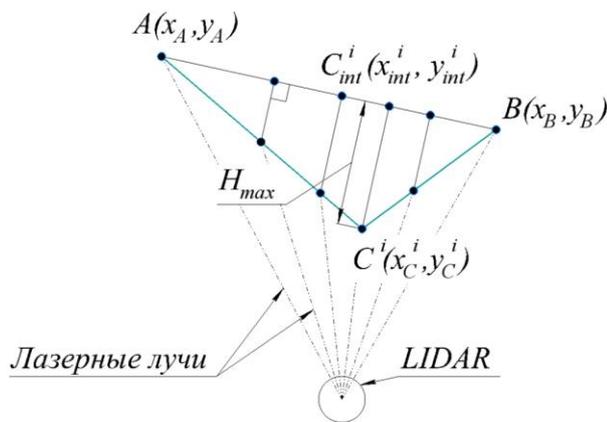


Рис. 4. Схема определения третьей характерной точки

Методика вычисления координат наиболее удаленной точки (т. С):

1. Определяется угловой коэффициент для отрезка АВ по формуле (3):

$$a_{AB} = (y_B - y_A) / (x_B - x_A). \quad (3)$$

2. Определяется угловой коэффициент для перпендикуляра к АВ по формуле (4):

$$a_{\perp}^{AB} = -1 / a_{AB}. \quad (4)$$

3. Вычисляется параметр b_{AB} по формуле (5):

$$y_A = a_{AB} \cdot x_A + b_{AB} \rightarrow b_{AB} = y_A - a_{AB} \cdot x_A. \quad (5)$$

4. Определяется параметр b_{\perp}^i для перпендикуляра к АВ, проходящего через каждую точку на границе препятствия, по формуле (6):

$$y_C^i = a_{\perp}^{AB} \cdot x_C^i + b_{\perp}^i \rightarrow b_{\perp}^i = y_C^i - a_{\perp}^{AB} \cdot x_C^i. \quad (6)$$

5. Координата x_{int}^i пересечения определяется по формуле (7):

$$x_{int}^i = (b_{\perp}^i - b_{AB}) / (a_{AB} - a_{\perp}^{AB}). \quad (7)$$

6. Координата y_{int}^i пересечения определяется по формуле (8):

$$y_{int}^i = a_{\perp}^{AB} \cdot x_{int}^i + b_{\perp}^i. \quad (8)$$

7. Определяется расстояние между точками C^i и C_{int}^i . Шаги 4–7 повторяются для каждой точки из массива точек препятствия.

4. Аппроксимация выпуклых препятствий

Для данного типа препятствий предлагается их аппроксимировать описанной окружностью.

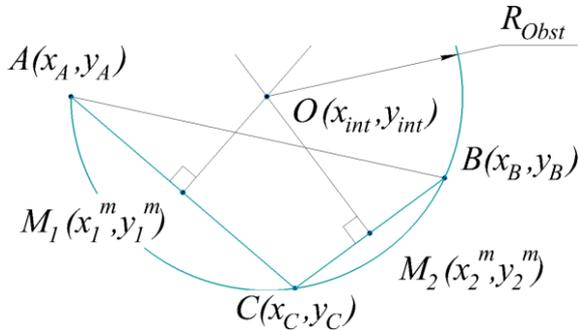


Рис. 5. Схема определения координат центра описанной окружности

Методика вычисления координат центра аппроксимирующей окружности и ее радиуса:

1. Находятся угловые коэффициенты для отрезков AC и CB :

$$\begin{aligned} a_{AC} &= (y_C - y_A) / (x_C - x_A), \\ a_{CB} &= (y_B - y_C) / (x_B - x_C). \end{aligned} \quad (9)$$

2. Определяются угловые коэффициенты для перпендикуляров к отрезкам AC и CB :

$$a_{\perp}^{AC} = -1/a_{AC}, \quad a_{\perp}^{CB} = -1/a_{CB}. \quad (10)$$

3. Рассчитываются координаты середин отрезков AC и BC .

4. Из уравнений (11), (12) определяются параметры b_{\perp}^{AC} и b_{\perp}^{CB} для срединных перпендикуляров отрезков AC и CB :

$$y_1^m = a_{\perp}^{AC} \cdot x_1^m + b_{\perp}^{AC} \rightarrow b_{\perp}^{AC} = y_1^m - a_{\perp}^{AC} \cdot x_1^m, \quad (11)$$

$$y_2^m = a_{\perp}^{CB} \cdot x_2^m + b_{\perp}^{CB} \rightarrow b_{\perp}^{CB} = y_2^m - a_{\perp}^{CB} \cdot x_2^m. \quad (12)$$

5. Определяется координата x_{int} пересечения срединных перпендикуляров по формуле (13):

$$x_{int} = (b_{\perp}^{AC} - b_{\perp}^{CB}) / (a_{\perp}^{CB} - a_{\perp}^{AC}). \quad (13)$$

6. Координата y_{int} пересечения срединных перпендикуляров определяется по формуле (14):

$$y_{int} = a_{\perp}^{AC} \cdot x_{int} + b_{\perp}^{AC}. \quad (14)$$

7. Определение радиуса описанной окружности производится по формуле (15):

$$R_{obst} = \sqrt{\Delta x_{AO}^2 + \Delta y_{AO}^2}. \quad (15)$$

5. Аппроксимация плоских препятствий

Данный тип препятствий можно разделить на два подтипа:

- 1) малое плоское препятствие, $L \leq 2kR$;
- 2) плоское препятствие типа «стена», $L > 2kR$.

Здесь L – длина плоского препятствия, m ; k – безразмерный коэффициент, $k \gg 1$; R – радиус описанной вокруг робота окружности.

5.1. Для малого плоского препятствия (МПП) предлагается в качестве характерных точек использовать начальную точку (т. A), конечную точку (т. B) из массива точек, принадлежащих границе препятствия, и среднюю точку (т. M) отрезка AB (рис. 6).

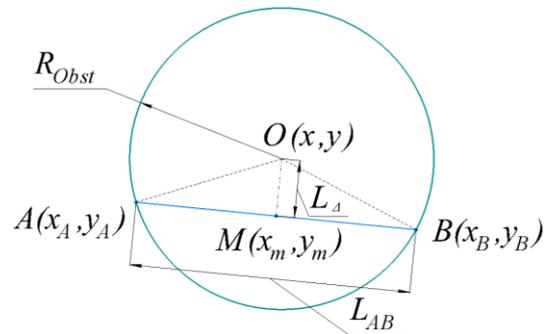


Рис. 6. Схема определения параметров малого плоского препятствия

Методика вычисления координат центра аппроксимирующей окружности МПП и ее радиуса:

1. Рассчитываются координаты (x_m, y_m) середины отрезка AB .

2. Экспертно задается величина смещения L_{Δ} центра окружности от отрезка AB .

3. Вычисляются координаты центра окружности по формулам (16):

$$\begin{aligned} x &= x_m - L_{\Delta} \cdot (y_B - y_A) / L_{AB}; \\ y &= y_m + L_{\Delta} \cdot (x_B - x_A) / L_{AB}. \end{aligned} \quad (16)$$

4. Определяется радиус окружности по формуле (17):

$$R_{obst} = \sqrt{\Delta x_{AO}^2 + \Delta y_{AO}^2}. \quad (17)$$

5.2. Для плоского препятствия типа «стена» предлагается аппроксимировать препятствие с помощью подвижной окружности (рис. 7).

1. Определяется угловой коэффициент для AB по формуле (18):

$$a_{AB} = (y_B - y_A) / (x_B - x_A). \quad (18)$$

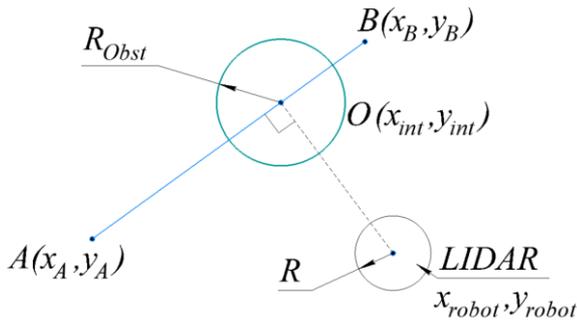


Рис. 7. Схема аппроксимации плоского препятствия типа «стена»

2. Определяется угловой коэффициент для перпендикуляра к AB :

$$a_{\perp}^{AB} = -1/a_{AB}. \quad (19)$$

3. Определяется параметр b_{\perp}^{AB} по формуле (20):

$$y_{robot} = a_{\perp}^{AB} \cdot x_{robot} + b_{\perp}^{AB} \rightarrow b_{\perp}^{AB} = y_{robot} - a_{\perp}^{AB} \cdot x_{robot}. \quad (20)$$

4. Из уравнения прямой AB определяется коэффициент b_{AB} :

$$y_A = a_{AB} \cdot x_A + b_{AB} \rightarrow b_{AB} = y_A - a_{AB} \cdot x_A. \quad (21)$$

5. Координата x_{int} определяется по формуле (22):

$$x_{int} = (b_{\perp}^{AB} - b_{AB}) / (a_{AB} - a_{\perp}^{AB}). \quad (22)$$

6. Координата y_{int} определяется по формуле (23):

$$y_{int} = a_{\perp}^{AB} \cdot x_{int} + b_{\perp}^{AB}. \quad (23)$$

7. Радиус окружности вычисляется по формуле (24):

$$R_{obst} = k_1 \cdot R, \quad (24)$$

где k_1 – коэффициент безопасности для плоского препятствия, $k_1 > 0$; R – радиус описанной вокруг робота окружности.

6. Аппроксимация вогнутого препятствия

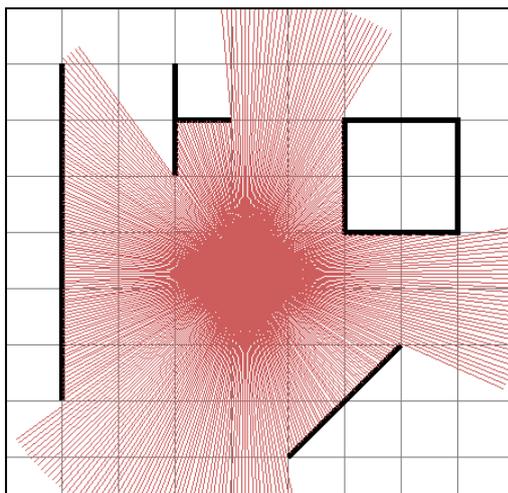
Препятствия данного типа могут быть аппроксимированы двумя способами:

- 1) аппроксимация по схеме для МПП (см. п. 5.1);
- 2) аппроксимация по схеме для препятствия типа «стена» (см. п. 5.2).

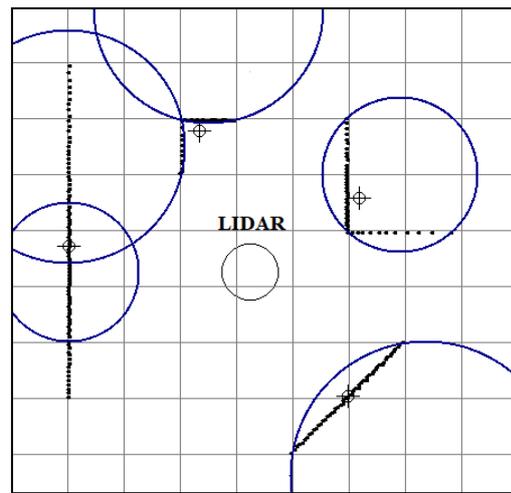
7. Результаты компьютерного моделирования

Была проведена серия численных экспериментов со следующими исходными параметрами: масштаб $s = 50$ пкс/м; дальность сканирования LIDAR $R_v = 3$ м (5 м); угловой шаг поворота лазерного излучатель-детектора $\Delta\varphi = 1^\circ$; радиус описанной вокруг робота окружности $R = 0,25$ м.

Результаты работы алгоритмов классификации и аппроксимации препятствий представлены на рис. 8–10.



а



б

Рис. 8. Совместная аппроксимация различных типов препятствий:
а – исходное представление препятствий и зона сканирования LIDAR;
б – результат классификации и аппроксимации препятствий

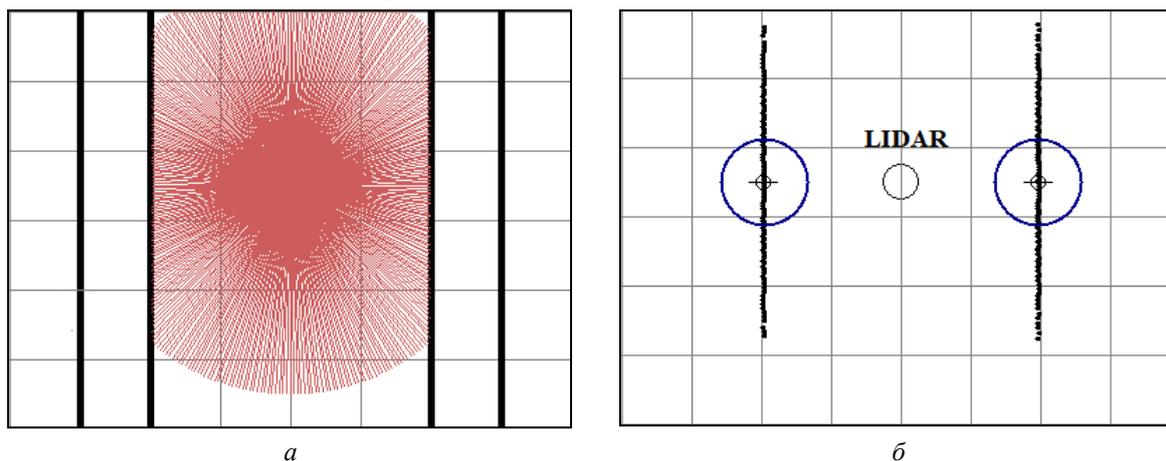


Рис. 9. Аппроксимация протяженных плоских препятствий:

a – исходное представление препятствий и зона сканирования LIDAR; *б* – результат классификации и аппроксимации препятствий

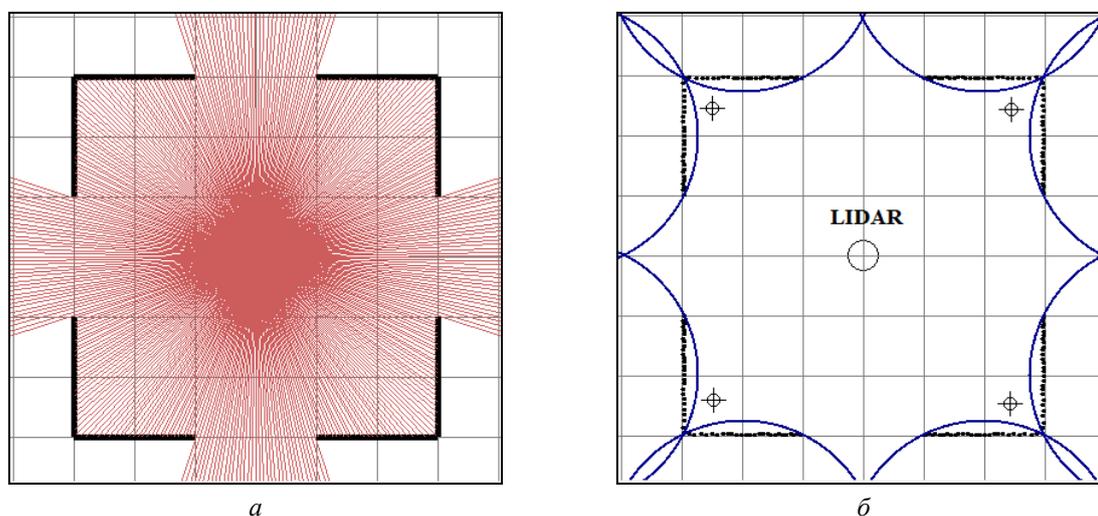


Рис. 10. Аппроксимация вогнутых препятствий:

a – исходное представление препятствий и зона сканирования LIDAR; *б* – результат классификации и аппроксимации препятствий

Заключение

Анализ результатов компьютерного моделирования показывает, что алгоритм классификации препятствий обеспечивает корректное определение типа препятствий по положению средневзвешенной точки относительно препятствия. Алгоритмы аппроксимации препятствий позволяют представлять исходные препятствия различных типов в виде геометрических примитивов, т. е. исходные препятствия оказываются вписанными в аппроксимирующие окружности. Предлагаемые алгоритмы работоспособны и могут быть применены на практике. В частности, описанные алгоритмы могут быть использованы совместно с методами автоматического планирования движения [4] для исследования и создания автоматических систем управления мобильными роботами в недетерминированной среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвеева, С. О. Навигация робота в помещении / С. О. Матвеева // Энергетические и электротехнические системы : Международный сборник научных трудов / под ред. С. И. Лукьянова, Н. В. Швидченко. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – 2015. – Вып. 2. – С. 317–323.
2. Роганов, В. Р. Сравнительный анализ систем имитации визуальной обстановки / В. Р. Роганов, В. О. Филиппенко // Современные информационные технологии. – 2014. – № 19. – С. 162–166.
3. Классификация наземных видов препятствий, встречаемых подвижным мобильным роботом / Е. В. Заргарян, Ю. А. Заргарян, А. Д. Коринец, И. М. Малышенко // Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров. Том 2. – Пенза : Пензенский государственный технологический университет. – 2015. – С. 13–16.
4. Леонард, А. В. Особенности планирования движения наземного робота с обходом стационарного препятствия на основе подхода VC/APF+BC₁¹ / А. В. Леонард // Известия ВолГТУ : научный журнал № 9 (280) / ВолГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 33–40.

УДК 635-151

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-41-44

*Н. С. Воробьева, И. А. Несмиянов, А. В. Дяшкин
В. В. Дяшкин-Титов, Е. Н. Захаров*

**РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР***

Волгоградский государственный аграрный университет

vgsxa@mail.ru

В статье рассматривается робототехнический комплекс, позволяющий автоматизировать технологические процессы укладки мульчирующей пленки, опрыскивания, дискретной прецизионной прополки сорняков в рядах при возделывании овощных культур.

Ключевые слова: роботизированный комплекс; овощные культуры, прополка; мульчирующая пленка; опрыскивание.

*N. S. Vorob'eva, I. A. Nesmiyanov, A. V. Dyashkin
V. V. Dyashkin-Titov, E. N. Zakharov*

**A ROBOTIC COMPLEX FOR THE CULTIVATION
OF VEGETABLE CROPS**

Volgograd State Agrarian University

The article considers a robotic complex that allows automating the technological processes of laying mulching film, spraying, and discrete precision weeding of weeds in rows during the cultivation of vegetable crops.

Keywords: robotic complex; vegetable crops, weeding; mulching film; spraying.

Введение

На сегодняшний день в России роботы в АПК в основном используют для переработки сельскохозяйственной продукции. Большинство операций по обработке пропашных (овощных) культур выполняется вручную. Поэтому разработка и внедрение роботизированных машин и роботов для технологических процессов возделывания овощных культур является актуальной задачей [1, 2]. Создание реконфигурируемых систем на основе различных модульных схем, адаптируемых для различных технологических процессов, является перспективной тенденцией современной сельскохозяйственной робототехники [3, 4].

Сущность модульного конструирования состоит в создании орудий на основе специально разработанной ограниченной номенклатуры модульных составных частей путем их различной компоновки по выбранным компоновочным схемам. Благодаря этому достигается рациональная унификация присоединительных размеров и главных параметров модульных составных частей, а также обеспечивается их функциональная и конструктивная совмести-

мость; имеется возможность улучшить эксплуатационные свойства техники, без ее полной замены.

Техническое решение

К технологиям, обеспечивающим экономию оросительной воды, регулирующим воздушный и тепловой режим, относится мульчирование поверхности. Этот агротехнический прием позволяет поддерживать корнеобитаемый слой почвы в рыхлом состоянии, подавлять рост сорняков и создавать в почве благоприятные условия для роста и развития растений [5].

Традиционно для мульчирования почвы используют навоз, торф, опилки, солому и другие растительные остатки. Не умаляя практической значимости этих материалов, являющихся одновременно органическими удобрениями, следует отметить, что в последнее время для мульчирования почвы чаще применяют различные синтетические материалы.

Разрабатываемый модуль предназначен для укладки и последующей перфорации мульчирующей пленки [6] с возможностью одновременной укладки системы капельного орошения.

© Воробьева Н. С., Несмиянов И. А., Дяшкин А. В., Дяшкин-Титов В. В., Захаров Е. Н., 2024.

* Работа выполнена в рамках НИР Минобрнауки РФ № FESR-2023-0009 «Разработка технологии возделывания овощных культур на основе использования современных методов селекции, первичного семеноводства с элементами роботизации».

В данном модуле предусмотрена возможность установки дополнительного узла для посадки семенного материала (например, посадка клубней картофеля), либо саженцев рассады овощных культур (например, томатов) (рис. 1).

Представленный модуль можно устанавливать на самоходное роботизированное устройство, а также монтировать к лонжеронам рамы шасси трактора ВТЗ-30СШ или агрегатироваться с тракторами класса до 3 кН (рис. 2).

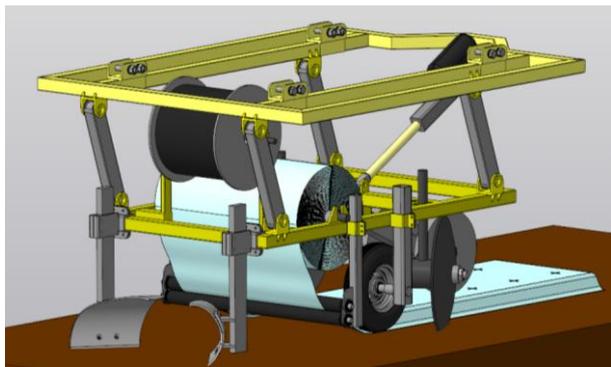
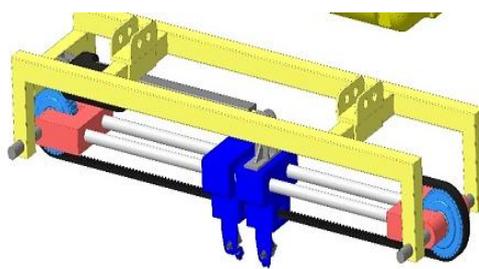
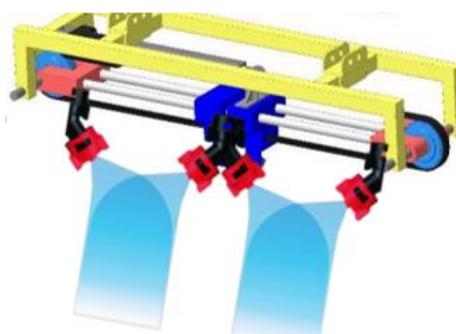


Рис. 1. 3d-модель модуля для укладки мульчирующей пленки

Модуль решает следующие поставленные задачи: формирование гряды, различной по высоте и ширине, в зависимости от типа посадочного материала; укладка оросительного трубопровода по центру сформированной гряды; укладка мульчирующей пленки с последующими прикатыванием прижимными колесами и при-



a



б

Рис. 3. 3d-модель модуля для опрыскивания

Технологический процесс обработки овощных культур модулем для полосового опрыскивания осуществляется следующим образом. В соответствии с программой полосовой обработки сельскохозяйственного поля пестицидами или жидкими минеральными удобрениями роботизированный комплекс для полосового опрыскивания овощных культур устанавливают

на край поля в точке ввода его в работу. Роботизированный комплекс получает карту и координаты начала работ. ПО рассчитывает оптимальную траекторию движения по междурядьям растений для полного прохода поля. Используя датчик технического зрения, роботизированный комплекс обнаруживает в режиме реального времени все растения на своем



Рис. 2. 3d-модель модуля для укладки мульчирующей пленки на базе тракторного самоходного шасси ВТЗ-30СШ

Модуль для полосового опрыскивания овощных культур (рис. 3) построен по принципу последовательного развития унифицированных модульных составных частей с целью изменения основных характеристик робототехнического комплекса [7].

на край поля в точке ввода его в работу. Роботизированный комплекс получает карту и координаты начала работ. ПО рассчитывает оптимальную траекторию движения по междурядьям растений для полного прохода поля. Используя датчик технического зрения, роботизированный комплекс обнаруживает в режиме реального времени все растения на своем

пути и получает информацию о том, какая растительность должна быть обработана и где она расположена. Определяется проекция контура обрабатываемых растений в вертикально-поперечной плоскости, и сигнал передается на блок управления, который, в свою очередь, задает величину перемещения подвижных кареток (рис. 3), в нижней части которых установлены корпуса с распылителями, соединенные с выходным штуцером насоса. Оси распылителей расположены в одной вертикальной плоскости и направлены навстречу друг к другу под углом, обеспечивающим направление слияния верхнего края конуса распыла с образованием потока внутрь, а нижние края конуса распыла не выходят за абрис расположения распылителя над почвой. Величина перемещения кареток обеспечивает полное покрытие контура обрабатываемых растений рабочим раствором, учитывая отклонение абриса растений от оси движения робототехнического комплекса.

Конструкция кареток и распылителей позволяет осуществить их быструю перекомпоновку, например, для смены насадки распылителя или добавления дополнительной каретки с распылителем (рис. 3, а, б). Количество кареток может быть увеличено до трех штук, а количество распылителей на одной каретке – до двух (рис. 3, б). Данные параметры устанавливаются в зависимости от обрабатываемой культуры овощей и технологического процесса, на котором задействован робототехнический комплекс с модулем полосового опрыскивания.

Дозирование количества пестицидов или жидких удобрений определяется в зависимости от величины абриса обрабатываемых растений на заданной площади [8].

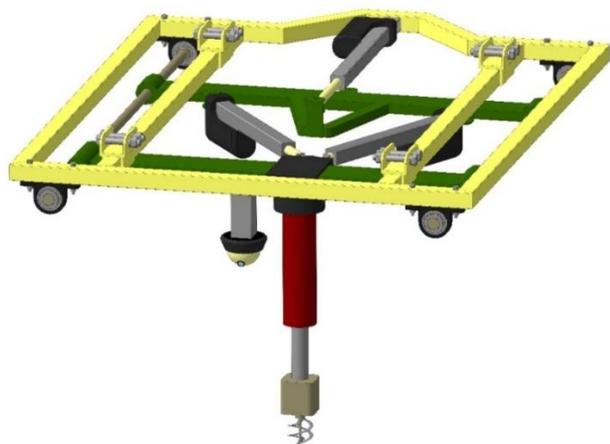


Рис. 4. 3d-модель модуля дискретной прецизионной прополки сорняков в рядках

Модуль дискретной прецизионной прополки сорняков [9] в рядках представлен на рис. 4.

Технологический процесс прополки с использованием модуля дискретной прецизионной прополки сорняков в рядках, разработанный с учетом агротехнических требований, осуществляется следующим образом. Робототехнический комплекс устанавливается в рядок с обрабатываемой культурой, и в автоматическом режиме происходит определение координат обнаруженных сорных растений при помощи системы технического зрения. После определения положения сорняка в пространстве осуществляется перемещение к нему режущего инструмента, представленного в виде двух ножей по схеме бура, таким образом, что он позиционируется над самим сорняком. В случае если режущий инструмент и сорняк находятся на небольшом расстоянии друг от друга по ходу движения шасси, то рабочий орган перемещается посредством исполнительных приводов. При нахождении режущего инструмента рабочего органа над сорняком срабатывает двигатель постоянного тока, который приводит в действие актуатор, и происходит перемещение рабочего органа вертикально вниз к сорняку. Таким образом, срезается сорняк и взрыхляется почва рядом с ним.

Использование роботизированного комплекса для полосового опрыскивания овощных культур при обработке пестицидами или жидкими минеральными удобрениями обеспечит повышение качества обработки растений, снижение гектарного расхода рабочего раствора и негативного влияния на окружающую среду.

Робототехническое средство с модулем дискретной прецизионной прополки сорняков позволяет уничтожать сорную растительность в автоматическом режиме, а также обеспечивать дополнительное кислородное питание для корней культурных растений за счет взрыхления почвы.

Точечная обработка повышает качество прополки рядов и междурядий возделываемых культур и позволяет снизить их травмирование.

Таким образом, представленные варианты исполнения роботизированного комплекса для возделывания пропашных культур позволят повысить эффективность технологических процессов, снизить энергозатраты и долю ручного труда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Годжаев, З. А. Тенденции развития средств мехатроники, автоматизации и роботизации для синтеза новых высокопроизводительных технологий и машин в сельском хозяйстве / З. А. Годжаев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2018. – № 3 (329). – С. 4–16.
2. Абросимов, В. К. Малые интеллектуальные роботы для решения задач точного земледелия: проблемы и решение / В. К. Абросимов, В. В. Елисеев // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2018. – № 4 (21). – С. 14–18.
3. Несмиянов, И. А. Особенности и проблемы разработки мобильных сельскохозяйственных роботов / И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева, В. С. Бочарников // *Прогресс транспортных средств и систем-2018 : Материалы международной научно-практической конференции*. – Волгоград, 2018. – С. 125–126.
4. Воробьева, Н. С. Синтез программных перемещений и алгоритмов систем управления реконфигурируемых манипуляторов параллельно-последовательной структуры. Специальность 2.5.4 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»: дис. ... д-ра техн. наук / Воробьева Наталья Сергеевна. – Волгоград, 2023. – 473 с.
5. The effect of sprinkler irrigation on the soil / Viktor Bocharnikov, Olesya Bocharnikova, Maria Denisova, Olga Kozinskaya and Tatiana Repenko *BIO Web of Conferences*, Volume 67, 2023, 02004.
6. Обоснование конструктивного исполнения роботизированного устройства для возделывания бахчевых культур под пленкой / Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин, Р. С. Ажгалиев, В. В. Дяшкин-Титов // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(268) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2022. – С. 19–23.
7. Пат. № 2796491 Российская Федерация. Роботизированный комплекс для полосового опрыскивания овощных культур / И. Б. Борисенко, Д. В. Скрипкин, М. В. Мезникова [и др.] ; ФГБОУ ВО ВолГАУ. – 2023.
8. Исследование качественных показателей опрыскивания с применением полосовой обработки на посадках картофеля / И. Б. Борисенко, О. Г. Чамурлиев, М. В. Мезникова, Д. В. Скрипкин, А. А. Габуншина, Д. А. Соколов // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. – 2023. – № 3 (71). – С. 403–413.
9. Пат. № 2703775 С1 Российская Федерация, МПК В25J 5/00, А01В 39/18, А01М 21/02. Робот-пропольщик / Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин, А. Г. Иванов ; ФГБОУ ВО ВолГАУ. – № 2019102105. – 2019.
10. Иванов, А. Г. Обоснование геометрических параметров робота-пропольщика / А. Г. Иванов, Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3(226) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2019. – С. 22–25.

УДК62-526 + 004.932.4

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-44-49

*А. С. Горобцов^{1, 2}, Е. Н. Рыжов¹, П. С. Тарасов¹***УПРАВЛЕНИЕ ЛОКОМОЦИЕЙ РОБОТА-АНДРОИДА МЕТОДОМ
ОБОБЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ
В НЕВЫРОЖДЕННОМ СЛУЧАЕ**¹ **Волгоградский государственный технический университет**² **ИМАШ РАН**

vm@vstu.ru

Рассмотрен синтез управления движением робота-андроида методом обобщенной задачи динамического уравновешивания для невырожденного случая матрицы связей математической модели – стояния на одной ноге. Анализируются динамические характеристики получаемого управляемого движения для различных законов изменения реакций в опоре.

Ключевые слова: управление, нелинейные системы, шагающие роботы, обратная задача, устойчивость движения.

*A. S. Gorobtsov, E. N. Ryzhov, P. S. Tarasov***THE CONTROL MOTION OF THE BIPPED ROBOTS BY GENERAL
BALANCE METHOD FOR NONSINGULAR CASE**¹ **Volgograd State Technical University**² **IMASH RAS**

The synthesis of motion control of an android robot by the method of generalized dynamic balancing problem for the non-degenerate case of a matrix of connections of a mathematical model – standing on one leg is considered. The dynamic characteristics of the resulting controlled motion are analyzed for various laws of reaction variation in the support.

Keywords: control, nonlinear systems, walking robots.

Введение

Нахождение программных реакций в приводах роботов многоногих шагающих роботов, в частности, роботов-андроидов, является акту-

альной задачей, поскольку управление с учетом программных сил и моментов в приводах предпочтительней, чем управление по отклонению. В существующих работах [1] для нахождения

программных реакций используется дополнительная математическая модель, наряду с моделью для определения кинематических параметров движения. Применение двух моделей нельзя признать эффективным, поскольку получаемые от таких моделей результаты не полностью согласованы. В настоящей работе для нахождения кинематических и силовых параметров программного движения используется метод обобщенной задачи динамического уравнивания [2, 3], дающий теоретически точное значение всех параметров управления для заданного закона реакций в опорах робота.

Математическая модель робота-андроида

Обобщенная задача динамического уравнивания [2, 3] служит для нахождения программных значений кинематических и динамических параметров движения механической системы одновременно с численным интегрированием уравнений математической модели системы. При численном интегрировании уравнений динамики на каждом шаге интегрирования решается система линейных алгебраических уравнений

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{D}^T \\ \mathbf{D} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор координат всей системы размерностью n ; \mathbf{M} – матрица инерции; $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$ – вектор позиционных, диссипативных и внешних сил; \mathbf{D} – матрица коэффициентов уравнений связей размерностью $k \times n (k \leq n)$; \mathbf{p} – вектор множителей Лагранжа размерностью k ; $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$ – вектор правых частей второй производной уравнений связей.

Решение системы линейных алгебраических уравнений (1), при соответствующих обозначениях, записывается в форме

$$\begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}. \quad (2)$$

Обобщенная задача динамического уравнивания заключается в следующем. Пусть в векторе реакций связей \mathbf{p} имеется подмножество реакций \mathbf{p}_1 с номерами из множества K_1 , количеством k_1 , значения которых должны принимать заданные величины, описываемые некоторыми функциями $\varphi_i(t), i = 1, 2, \dots, k_1$. Предположим также, что в векторе реакций связей \mathbf{p} имеется подмножество реакций \mathbf{p}_2 с номерами из множества K_2 , количеством k_2 , которые могут варьироваться за счет изменения значений

функций управления $h_{2j}(t), j = 1, 2, \dots, k_2$. В [2, 3] показывается, что при численном интегрировании (1) на каждом шаге интегрирования функции управления находятся из системы линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{h}_2(t) = \boldsymbol{\varphi}(t) - \mathbf{p}_{10}, \quad (3)$$

где \mathbf{A}_1^{-1} – соответствующая множеству K_1 подматрица \mathbf{A}^{-1} – состоит из строк \mathbf{A}^{-1} , номера которых принадлежат K_1 ; $\mathbf{p}_{10} = \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{b}$.

Решение (1) с учетом (3) дает одновременно кинематические параметры программного движения и управляющие реакции в приводах. Указанное решение можно считать решением прямой задачи – моделированием управляемого движения, поскольку оно не является решением обратной задачи, а программное движение задается не кинематическими параметрами, а реакциями в опорах. Основная трудность в использовании (1)–(3), как и во всех других методах нахождения программного движения роботов [4] – вырожденность матрицы \mathbf{A} в общем случае. В настоящей работе рассматривается задача равновесия робота-андроида в положении стояния на одной ноге, что соответствует невырожденному случаю матрицы \mathbf{A} и позволяет непосредственно использовать уравнения (1)–(3) без дополнения методами регуляризации. Расчетная схема и начальное положение робота показаны на рис. 1, на котором маркерами пружин отмечены приводы системы управления.

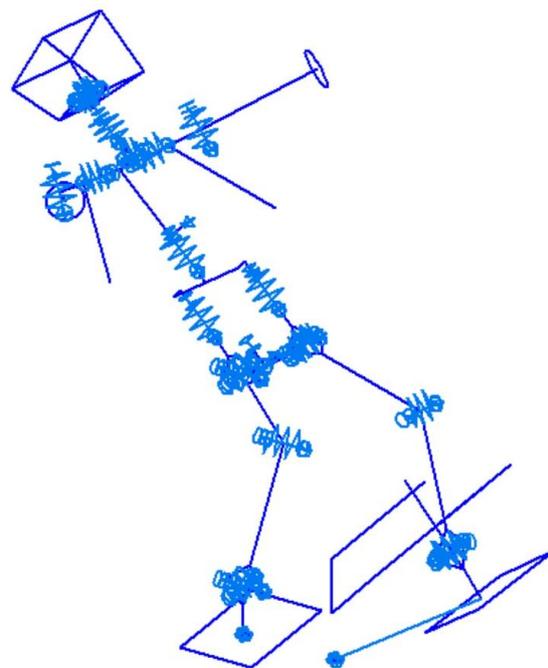


Рис. 1. Расчетная схема и начальное положение робота-андроида

Равновесие робота-андроида при изменении реакций в опоре

Исследовалось пространственное движение робота-андроида в положении стояния на одной ноге, при изменении компонент реакций связей в опорной ноге робота. Реакции в опоре содержали шесть компонент – три силы и три момента. Уравнения (1)–(3) реализованы в системе моделирования ФРУНД [5]. Простейший слу-

чай управления – изменение момента реакции в опоре относительно оси x – продольной оси робота и реализация такого изменения за счет поворота правой ноги в относительно продольной оси бедренного сустава. В этом случае $k_1=k_2=1$. Программный момент реакции изменялся симметрично на величину отклонения $10 \text{ Н}^*\text{м}$ от статического значения за 9 с (рис. 2). Кинограмма движения робота показана на рис. 3.



Рис. 2. Программный момент реакции в опоре относительно продольной оси робота

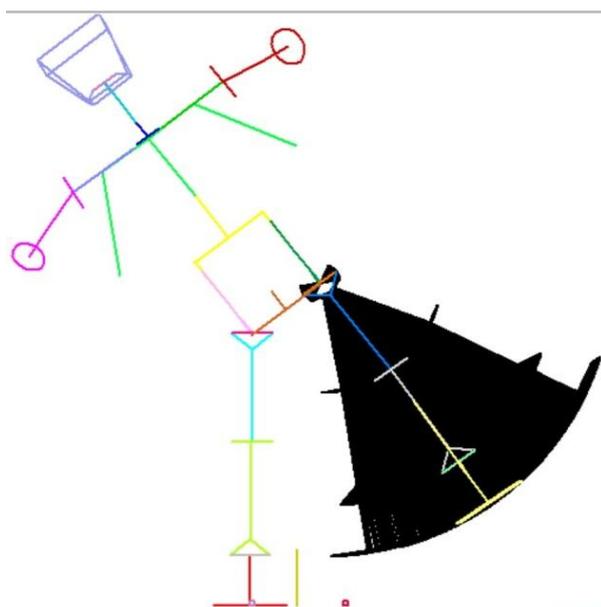


Рис. 3. Кинограмма управляемого движения робота при изменении момента в реакции по заданному закону

Расчеты показали, что движение ноги для отработки заданного программного момента содержит периодическую составляющую, которая определяется инерционным моментом движения ноги. При уменьшении периода программного момента с 9 до 4 с периодическая составляющая резко возрастает, поскольку увеличивается соответствующий инерционный момент (рис. 4).

После возвращения момента реакции к начальному значению колебательное движение ноги робота продолжается (рис. 4). При уменьшении периода изменения программного момента до 4 с амплитуда периодической составляющей резко возрастает (рис. 4). Такая периодическая составляющая может гаситься внешним демпфированием или корректировкой закона управления моментом реакции с учетом сил демпфирования.

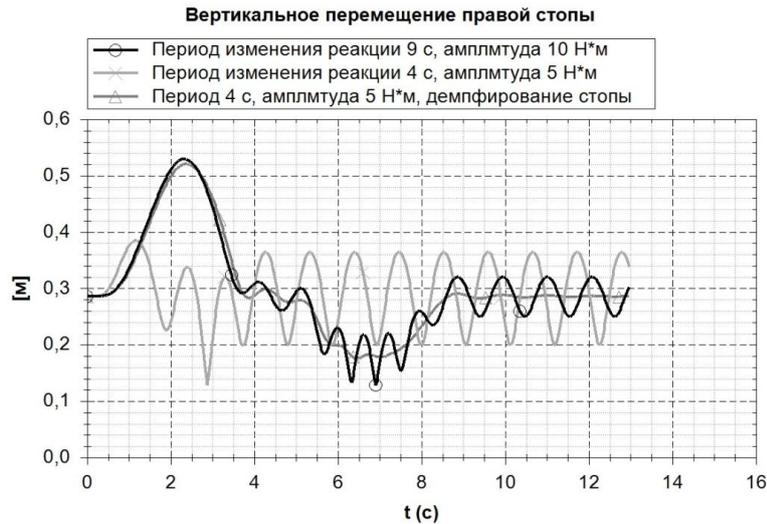


Рис. 4. Вертикальное перемещение правой стопы при различных законах изменения программного момента относительно оси x

Как уже отмечалось, рассматриваемый метод позволяет находить управляющие моменты в произвольном количестве приводов. Например, если в рассмотрение ввести еще и приводы рук относительно оси y , то движение робота будет иметь вид, показанный на рис. 5. В этом случае $k_1=3$; $k_2=1$; матрица A_1 будет прямоугольной, и для получения однозначного решения можно ввести дополнительные уравнения с произвольными коэффициентами. Представ-

ленные на рис. 5 результаты получены для дополнительных уравнений вида $h_{21}=h_{22}$ и $h_{21}=h_{23}$. Варьированием коэффициентов дополнительных уравнений можно изменять параметры получаемого движения робота. Такой вариационный подход в настоящее время принято называть машинным обучением. Таким образом, синтез управления с использованием (1)–(3) сводится к задаче машинного обучения при $k_1 > k_2$.

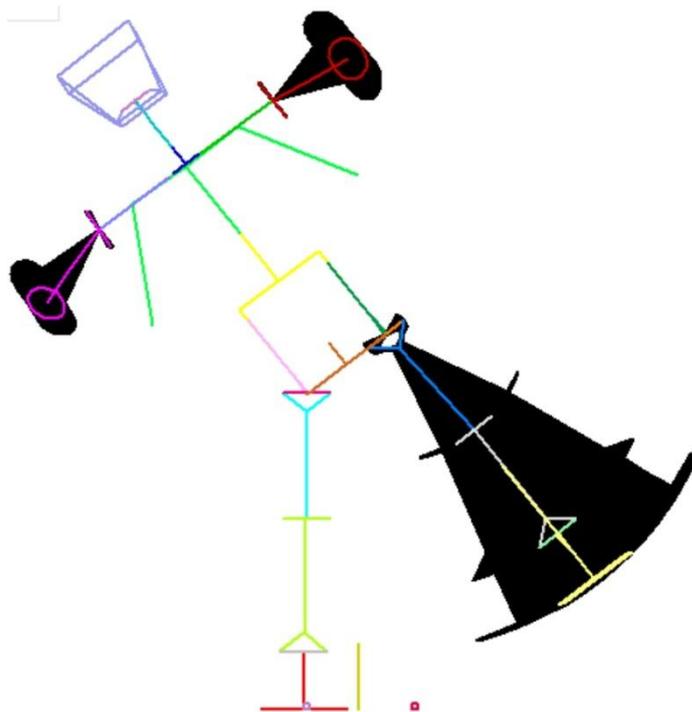


Рис. 5. Кинограмма управляемого движения робота при изменении момента реакции M_x по заданному закону с дополнительным управлением приводами рук

Управление движением робота заданием только одной компоненты вектора реакций связей выражается в достаточно простом движении всего робота. Можно усложнить программное движение робота, задав, например, силе реакции в опорной ноге в поперечном направлении постоянное значение. В этом случае, при рассмотренном законе реакции M_x (рис. 2), робот дол-

жен выполнить угловой поворот на некоторый угол относительно продольной оси и остановиться, поскольку суммарный внешний момент, действующий на робот, не изменился. На рис. 6 показана кинограмма такого движения, полученная для управления приводами левой стопы и бедра относительно продольной оси $k_1=k_2=2$. Амплитуда момента $5,5 \text{ Н*м}$, период 3 с.

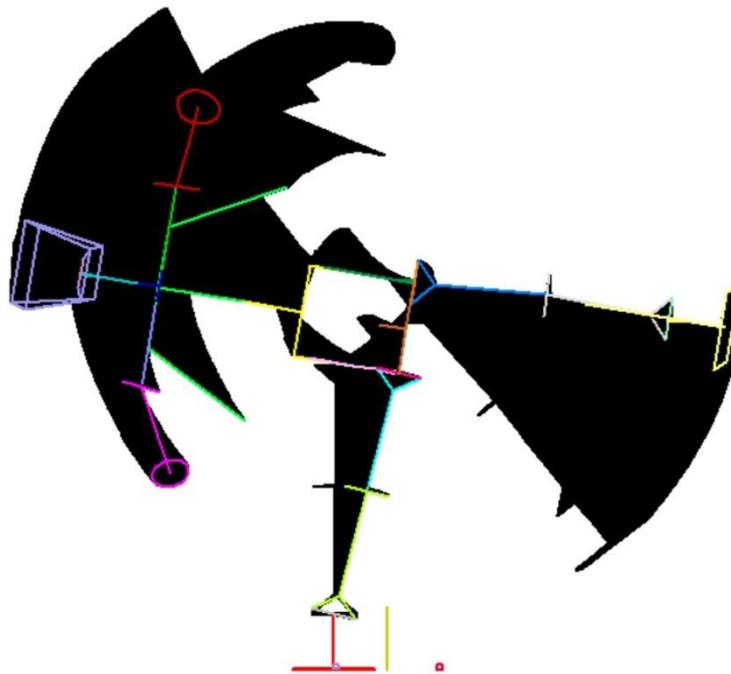


Рис. 6. Кинограмма управляемого движения робота для двух программных реакций в опоре M_x, R_y и управлении двумя приводами левой ноги

Такое вращательное движение робота можно получить и при управлении несколькими приводами, т. е. при $k_1 > k_2$. В расчетном исследовании получен поворот робота при $k_1=5$. Движение с управлением по силам, как известно из теории автоматического управления, неустойчиво, что проявляется на математической модели – модель не достигает состояния покоя в конечный момент времени, и в дальнейшем скорость только нарастает. Исследование устойчивости управления в рассматриваемом подходе в данной работе не рассматривается.

Заключение

Применение метода обобщенной задачи динамического уравнивания позволяет получать программные величины управляющих сил и моментов в приводах для заданных законов изменения внешних сил, действующих на пространственную механическую систему (в частности, робот-андроид). Это дает возможность

планирования кинематических параметров движения робота по кинематическим параметрам движения его центра масс, на которые оказывают влияние только внешние силы. Метод не требует в явном виде задания движения тел робота и применим для произвольного количества задающих реакций и приводов, при условии невырожденности матрицы математической модели. Метод обладает значительным потенциалом для получения оптимальных решений в случае избыточных приводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Optimization-based full body control for the darpa robotics challenge / S. Feng, E. Whitman, X. Xinjilefu, C. Atkeson // Journal Of Field Robotics. – 2015. – Vol. 32. – Pp. 293–312.
2. Gorobtsov, A. Optimal Greedy Control in Reinforcement Learning / A. Gorobtsov, O. Sychev, Yu. Orlova, E. Smirnov, O. Grigoreva, A. Bochkin, M. Andreeva // Sensors. – 2022. – P. 14.

3. Горобцов, А. С. Обобщенная задача динамического уравнивания и перспективные направления ее применения / А. С. Горобцов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – С. 14–24.

4. Особенности решения уравнений метода обратной задачи для синтеза устойчивого управляемого движе-

ния шагающих роботов / А. С. Горобцов, А. Е. Андреев, А. Е. Марков, А. А. Скориков, П. С. Тарасов // Информатика и автоматизация. – 2019. – № 18. – С. 85–122.

5. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей / А. С. Горобцов, С. К. Карцов, А. Е. Плетнев, Ю. А. Поляков. – М. : Машиностроение, 2011. – 462 с.

УДК62-526 + 004.932.4

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-49-54

А. С. Горобцов^{1,2}, Е. Н. Рыжов¹, Н. В. Чигиринская¹, О. К. Чесноков¹

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТА-СОБАКИ МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

¹Волгоградский государственный технический университет

²ИМАШ РАН

vm@vstu.ru

Представлен метод синтеза управления движением четырехногого робота-собаки методом обратной задачи. Используется универсальный генератор походки, определяющий трехмерную траекторию движения точки стопы для произвольного числа ног. Решается обратная и прямая задача. Анализируется устойчивость управляемого движения робота.

Ключевые слова: управление, нелинейные системы, шагающие роботы, обратная задача, устойчивость движения.

A. S. Gorobtsov^{1,2}, E. N. Ryzhov¹, N. V. Tchigirinskay¹, O. K. Chesnokov¹

THE CONTROL MOTION OF THE FOUR LEGGS ROBOTS BY INVERSE DYNAMIC METHOD

¹Volgograd State Technical University

²IMASH RAS

A method for synthesizing motion control of a four-legged robot dog using the inverse problem method is presented. A universal gait generator is used, which determines the three-dimensional trajectory of the foot point for an arbitrary number of legs. The inverse and direct problem is solved. The stability of the controlled movement of the robot is analyzed.

Keywords: control, nonlinear systems, walking robots.

Введение

Четырехногие шагающие роботы – роботы-собаки – активно совершенствуются в настоящее время, поскольку устойчивость движения для таких роботов обеспечивается значительно проще, чем, например, устойчивость двуногих роботов-андроидов. Популярным методом синтеза управления данными роботами является так называемое обучение с подкреплением [1–2], в котором управляющие силы (моменты) в приводах интерполируются рекуррентной нейронной сетью, параметры которой определяются в процессе обучения. Для обучения, как правило, используется модель динамики движения робота как системы твердых тел. Решается прямая задача динамики. В работах [2–3] обучение с подкреплением выполнялось при коэффициенте дисконта 0,9 и было получено управление для

некоторых режимов движения по ровной и неровной поверхности. Тем не менее в существующих работах нет анализа робастности полученных алгоритмов управления. Кроме этого, обучение с подкреплением для задач оптимального управления многомерными системами требует значительных вычислительных затрат – используются мощные вычислительные кластеры. Все это делает актуальной разработку альтернативных методов управления. В настоящей работе рассматривается метод управления движением робота собаки на основе универсального генератора походок. При таком подходе может быть повышена вычислительная эффективность метода синтеза управления, за счет значительного сокращения размерности пространства параметров интерполяционной модели, в методах машинного обучения.

Универсальный генератор походок шагающих роботов

Генератор походок [4] реализует алгоритмы планирования трехмерной траектории точки стопы шагающего движителя на основе учета прогноза траектории движения точки корпуса, которая расположена в месте крепления рассматриваемого шагающего движителя. Такой подход позволяет получать связанное движение некоторого числа шагающих движителей с произвольным движением корпуса робота. В работах [4, 5] представлено использование такого генератора походок для получения программного движения двуногих и шестиногих шагающих роботов.

Перечислим параметры генератора походок для одного движителя: h – высота подъема стопы; L – максимальная длина шага; kp – отношение времени переброса стопы к сумме времени

подъема, опускания и опоры; фаза стопы в долях периода шагания, T – минимальный период цикла шагания; x, y, z – разницы между координатами заданных точек стопы и корпуса по трем направлениям в системе координат корпуса, которые определяют относительное положение стоп в покое. На рис. 1 показаны графики вертикального перемещения точек двух стоп для случая симметричного расположения в цикле шагания. Траектории могут интерполироваться различными гладкими функциями – тригонометрическими и степенными (сплайнами) без скачков первых и вторых производных. Главная особенность метода – определение длины шага с использованием прогноза движения точки корпуса робота, в которой крепится движитель. Прогноз строится в предположении равноускоренного пространственного движения такой точки.

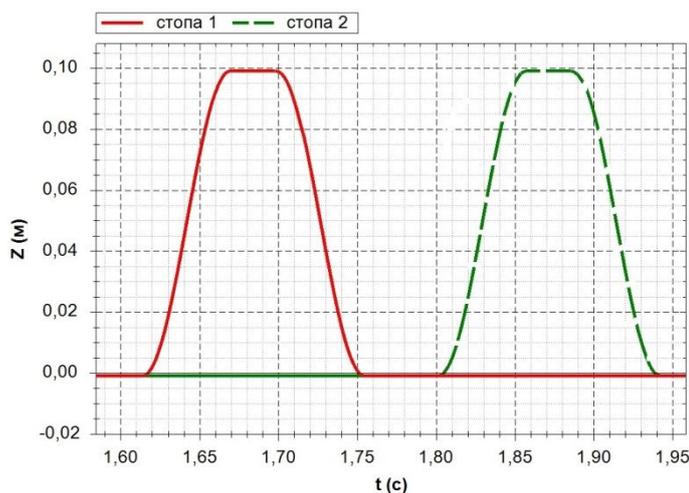


Рис. 1. Программное вертикальное перемещение двух стоп в одном цикле шагания

Генератор походок позволяет синтезировать пространственные траектории заданных точек стоп при произвольном пространственном движении корпуса и неровной опорной поверхности. Генератор допускает формирование траекторий стоп при групповом движении роботов [6].

Пример сгенерированного программного движения робота-собаки показан на рис. 2.

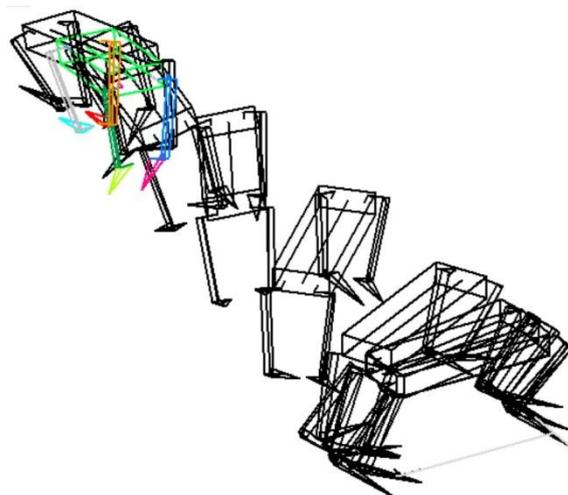


Рис. 2. Кинограмма сгенерированного программного пространственного движения робота-собаки – движение вбок с одновременным поворотом

**Математическая модель
робота-собаки**

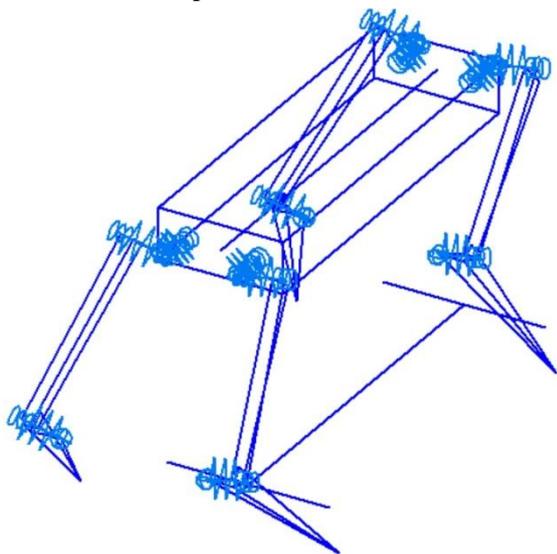


Рис. 3. Расчетная схема робота-собаки; маркерами пружин показаны приводы

Расчетная схема робота-собаки показана на рис. 3. Характерные размеры модели: продольное расстояние между стопами – 700 мм; поперечное – 400 мм; полная масса – 28 кг; масса корпуса – 20 кг. Модель содержит 12 приводов.

**Управляемое движение
робота-собаки**

Управляемое движение робота исследовалось при решении прямой задачи динамики на разработанной математической модели. В системе моделирования ФРУНД [7, 8] реализовано одновременное решение обратной и прямой задачи. Обратная задача служит для нахождения параметров программного движения; решение прямой задачи моделирует управляемое движение робота. Рассматривался прямолинейный разгон робота до скорости 2 м/с за 6 с, равномерное движение в течение 3 с и остановка за 2 с (рис. 4).

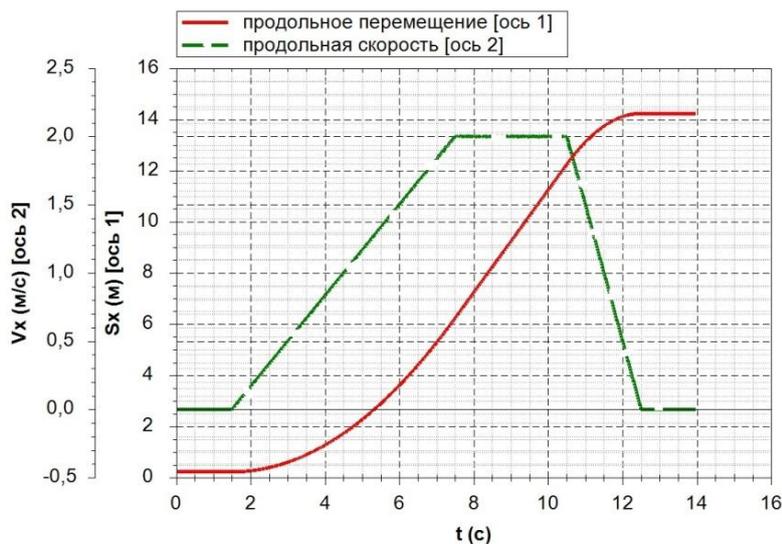


Рис. 4. Программное перемещение и скорость робота при разгоне и торможении

На рис. 5 представлены результаты моделирования управляемого движения робота. Управление моментом в приводах производилось с помощью ПД регуляторов по отклонениям угла и угловой скорости в сочленении. Номинальные параметры ПД регулятора: коэффициент усиления по отклонениям положения 250 (Нм/рад), угловой скорости 20 (Нм/(рад/с)). При меньших значениях коэффициента усиления по положению робот падал при достижении скорости 0,3–0,4 м/с.

Максимальные значения управляющих моментов имели место в приводе голени и изменялись в диапазоне +50 и –100 Н*м на начальном участке разгона; +180 и –250 Н*м на участке постоянной скорости. Пиковые значения управляющего момента в правой передней голени в 1,5 раза выше, чем в левой, несмотря на симметричность походки. На участке разгона максимальные приводные моменты наблюдаются в задних ногах, а при торможении – в передних.

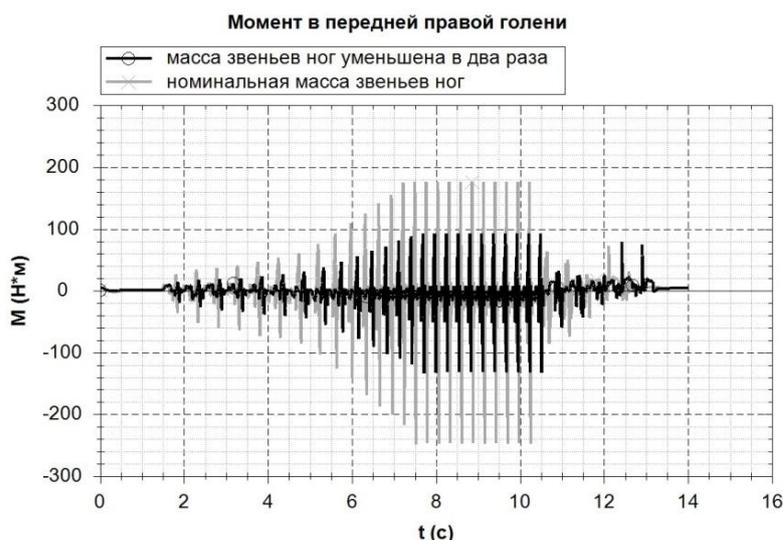


Рис. 5. Управляющие моменты в приводе голени передней правой ноги

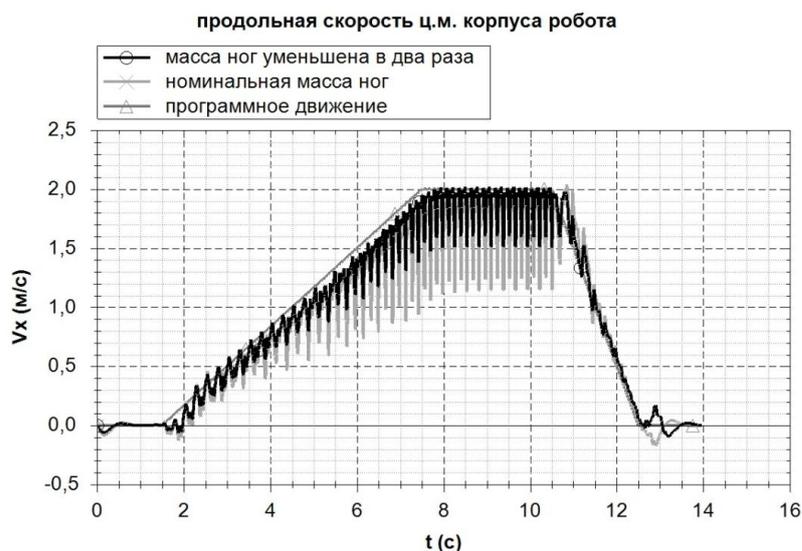


Рис. 6. Продольная скорость корпуса робота при разных массах ног

Пиковые значения моментов приводов связаны с инерционными силами – при уменьшении масс звеньев ног в два раза максимальные значения моментов уменьшались почти в два раза (рис. 5). Неравномерность движения кузова с уменьшением массы ног падает пропорционально (рис. 6). Пиковые значения до определенной границы не оказывают существенного влияния на управляемое движение – при уменьшении максимального момента привода до 100 Н*м движение робота изменяется незначительно.

Следует отметить, что рассмотренные номинальные значения ПД регулятора хотя и обеспечивают удовлетворительное воспроизведение программной траектории самого робо-

та, однако погрешности отслеживания программных углов приводов достигают $0,2 \text{ рад}$ (40 % в относительных величинах). Увеличение коэффициентов ПД регулятора в 10 раз незначительно приближает управляемое движение корпуса робота к программному движению, однако вызывает рост максимальных значений приводных моментов в 2–3 раза.

На рис. 7 показан график изменения мощности в приводах задней правой ноги. Пиковая мощность в приводе голени достигает нескольких киловатт, что в первую очередь связано с нерациональными инерционными параметрами ног. Отметим, что приводы существенную часть времени работают в режиме торможения.

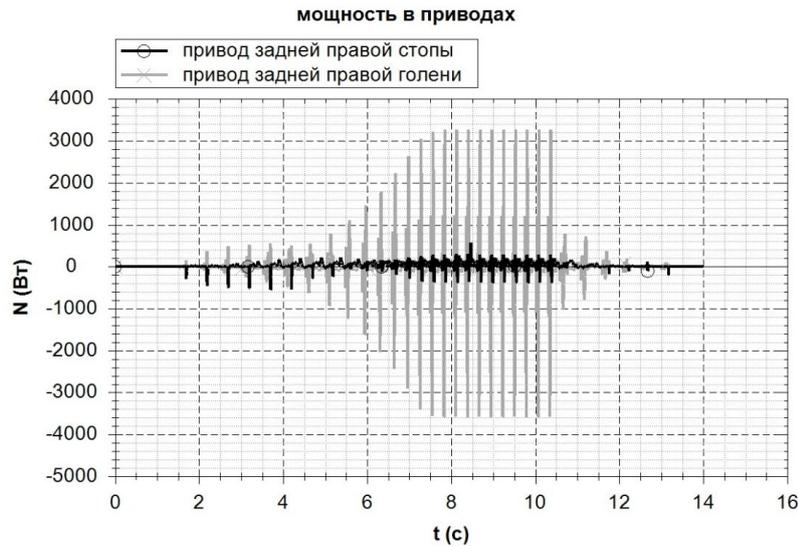


Рис. 7. Мощность в приводах

Важным параметром походки, влияющим на устойчивость движения, является интервал времени, в котором все стопы находятся в опоре. Представленные выше результаты получены для походки, в которой доля времени опоры всеми ногами к периоду шага равнялась 0,3;

при уменьшении этой величины до 0,05 устойчивость движения ухудшалась, что проявлялось в увеличении рыскания робота. Однако при этом максимальные моменты в приводах уменьшались почти в два раза.

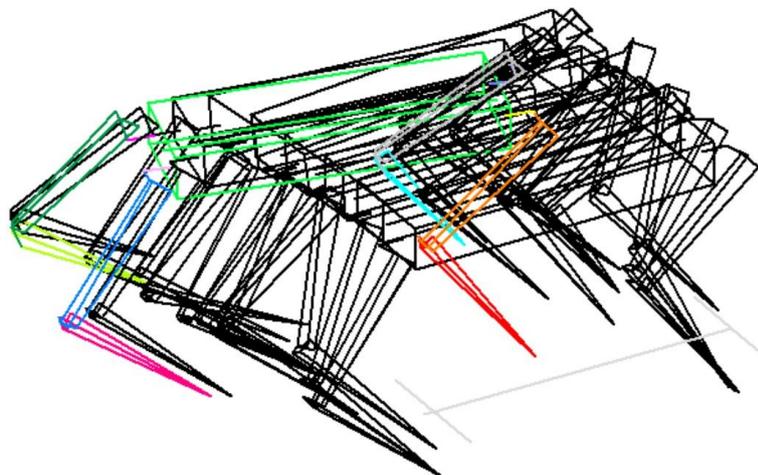
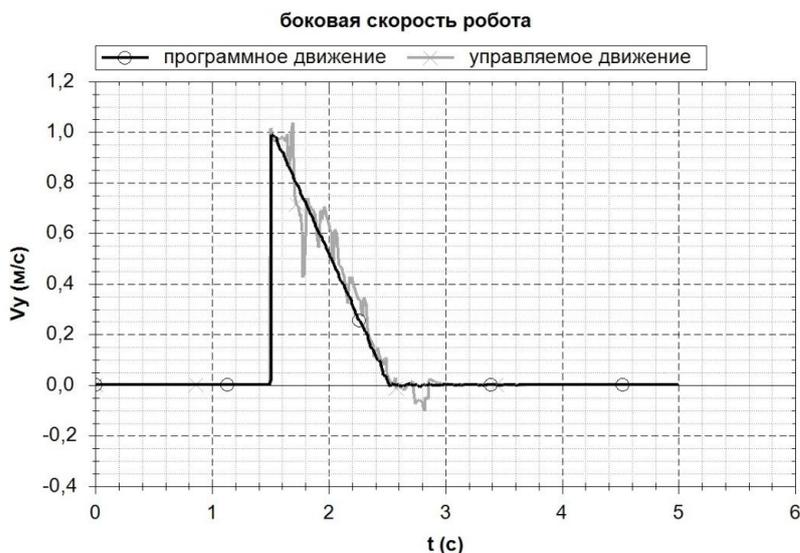


Рис. 8. Кинограмма перемещения робота при боковом возмущающем импульсе

При моделировании управляемого движения взаимодействие стопы с опорной поверхностью представлялось упруго-вязкой моделью в вертикальном направлении и кулоновым трением в горизонтальном. Сила трения зависела от вертикальной реакции. Жесткость вертикального взаимодействия составляла 40 кН/м, что соответствовало частоте вертикальных колебаний робота на опорах 12 Гц. При увеличении жесткости имело место увеличение разности между программным и управляемым движением по

продольной координате. Увеличение коэффициента линейной вязкости (номинальное значение 2 кН/(м/с) в опоре также незначительно улучшает управляемое движение, а при дальнейшем росте приводит к неустойчивости движения. Выбранные параметры упруго-вязкого контакта можно считать рациональными.

На усилия в приводах оказывает существенное влияние высота шага. При уменьшении высоты шага с 10 до 3 см моменты в приводах уменьшаются почти в два раза.



Адаптивный генератор походки позволяет реализовывать режимы движения, компенсирующие внешние возмущения. На рис. 8 показано движение робота при боковом возмущающем импульсе, сообщающем центру масс робота боковую скорость 1 м/с. Такой импульс может быть компенсирован на основе программного движения в форме быстрого разгона и остановки за короткое время (рис. 9). В этом режиме существенное влияние имеет минимальный период шага походки. Данные на рис. 8 и 9 соответствуют минимальному периоду шага 0,29 с. При большем значении этого параметра робот в управляемом движении переворачивается. При расчете управляемого движения возмущение моделируется импульсной силой, сообщающей необходимую скорость возмущения за время 0,01 с.

Заключение

Рассмотренный метод управления роботом-собакой на основе пространственного адаптивного генератора походки шагающих роботов не требует высоких вычислительных затрат по сравнению с различными модификациями метода Монте-Карло, лежащими в основе методов обучения с подкреплением. Метод допускает интерполяцию управления нейронными сетями для реализации на мобильных вычислительных устройствах невысокой производительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Learning to walk via deep reinforcement learning / T. Haarnoja, S. Ha, A. Zhou, J. Tan, G. Tucker, S. Levine // ArXiv Preprint, 2018.
2. Sim-to-real learning of all common bipedal gaits via periodic reward composition / J. Siekmann, Y. Godse, A. Fern, J. Hurst // 2021 IEEE International Conference On Robotics And Automation (ICRA). – 2021. – Pp. 7309–7315.
3. Surana, S. Efficient Learning of Locomotion Skills through the Discovery of Diverse Environmental Trajectory Generator Priors / S. Surana, B. Lim, A. Cully // ArXiv Preprint, 2022.
4. Программно-аппаратный комплекс для создания и исследования систем управления локомоцией и автономным движением мобильных роботов / А. С. Горобцов, А. Е. Марков, П. С. Тарасов, Ан. В. Скориков, А. В. Дианский, Д. А. Степаненко // Известия ВолГТУ : научный журнал № 9 (256) / ВолГТУ. – Волгоград, 2021. – С. 21–25.
5. Особенности решения уравнений метода обратной задачи для синтеза устойчивого управляемого движения шагающих роботов / А. С. Горобцов, А. Е. Андреев, А. Е. Марков, А. А. Скориков, П. С. Тарасов // Информатика и автоматизация. – 2019. – № 18. – С. 85–122.
6. Управление согласованным движением группы шагающих роботов при переносе груза / А. С. Горобцов, А. К. Алешин, Г. В. Рашоян, С. А. Скворцов, С. К. Шалюхин // Справочник. Инженерный журнал. – 2019. – С. 9–16.
7. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей / А. С. Горобцов, С. К. Карцов, А. Е. Плетнев, Ю. А. Поляков. – М. : Машиностроение, 2011. – 462 с.
8. 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.

УДК 62-529.4+629.369
DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-55-59

Е. В. Дементьев, Е. С. Брискин

КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ПОДВОДНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

Предлагается конструкция и описывается принцип работы транспортной системы для перемещения груза под водой в заданную область. При движении системы по наклонно расположенным направляющим происходит циклическое наполнение понтонов сжатым воздухом из резервуара, а далее его сброс в окружающую водную среду. За счет этого изменяется подъемная сила, возникает вертикальная и горизонтальная составляющая движения. Перемещение происходит только за счет энергии сжатого воздуха.

Ключевые слова: подводная транспортная система, положительная и отрицательная плавучесть, энергия сжатого воздуха, выталкивающая сила.

E. V. Dementiev, E. S. Briskin

THE DESIGN SCHEME AND THE PRINCIPLE OF OPERATION OF THE UNDERWATER ROBOTIC TRANSPORT SYSTEM

Volgograd State Technical University

The design is proposed and the principle of operation of the transport system for moving cargo underwater to a given area is described. When the system moves along the inclined guides, the pontoons are cyclically filled with compressed air from the tank, and then it is discharged into the surrounding water environment. Due to this, the lifting force changes, there is a vertical and horizontal component of movement. The movement takes place only due to the energy of compressed air.

Keywords: underwater transport system, positive and negative buoyancy, compressed air energy, buoyancy force.

Введение

Одной из актуальных проблем мобильной робототехники является перемещение полезных грузов в придонных областях мирового океана. Как правило, существующие проекты предполагают использование робототехнических платформ на основе гусеничных или шагающих движителей [1–3]. Возможно применение и «шагающеподобных» движителей на основе якорно-тросовых [4, 5] и якорно-тросово-гусеничных механизмов [6]. Эти движители, в отличие от традиционных, обладают более высокой профильной проходимостью за счет изменения характера взаимодействия с опорной поверхностью. Вместо опоры на грунт – подтягивание робота-понтон с небольшой положительной плавучестью к якорю груза, находящегося на дне водоема. Однако абсолютная профильная проходимость с надежным позиционированием робота достигается при наличии заранее проложенной ровной трассы.

Такой трассой, неподверженной изменению под влиянием течений и других факторов,

может быть подводная дорога с гибкими или жесткими направляющими (далее «направляющие»).

Особенностью такого способа перемещения может являться и то, что движение грузов, перемещающихся на платформах по направляющим, возможно за счет управления плавучестью.

Так, имея емкости со сжатым воздухом, можно регулировать плавучесть и осуществлять перемещение платформы вдоль направляющих в произвольном направлении.

Постановка задачи

Ставится задача разработать конструктивную схему и описать принцип работы подводной роботизированной транспортной системы (ПРТС), использующей для перемещения в толще воды наклонно расположенные направляющие и осуществляющей движение от одной заданной точки до другой (как по вертикали, так и по горизонтали), применяя только энергию сжатого воздуха.

© Дементьев Е. В., Брискин Е. С., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

Кинематическая схема

Система подъема груза состоит из грузовой понтонной робототехнической платформы (ПРП) 1 (рис. 1), соединенной с направляющими 3 дороги посредством узла скольжения 6. Направляющие 3 крепятся ко дну водоема посредством опор различной длины 2 и имеют определенный наклон (положительный или

отрицательный), определяемый углом α .

Направляющие через опоры крепятся определенным образом ко дну, и их траектория представляет собой ломаную линию, средняя линия которой горизонтальная (при условно горизонтальном профиле дна) или имеет определенный наклон при подходе к берегу (поверхности водоема) (рис. 2).

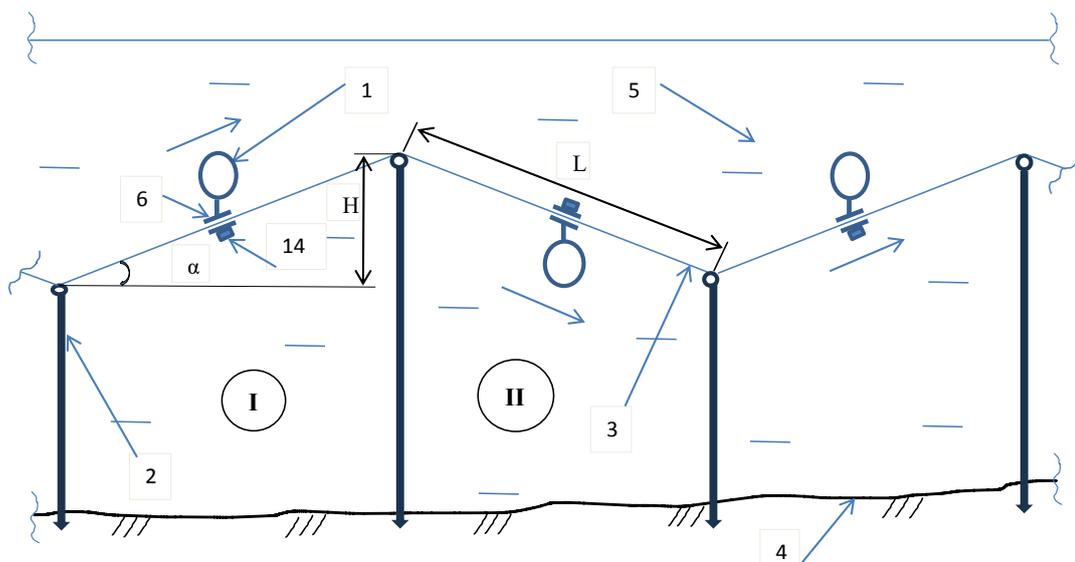


Рис. 1. Система подъема груза:

1 – понтонная робототехническая платформа (ПРП); 2 – опора направляющей; 3 – направляющие; 4 – рельеф дна; 5 – вода; 6 – узел скольжения ПРП по направляющей; 14 – датчик наклона узла скольжения
I – этап движения ПРП вверх; II – этап движения ПРП вниз



Для максимизации длины горизонтальной составляющей L наклонного участка трассы I (восходящего) или II (нисходящего) (рис. 1) угол α наклона направляющих должен быть минимальным, но не ниже $\alpha_{\text{мин}}$, при котором движение невозможно, так как развиваемое тя-

говое усилие не может превысить силу трения в узле скольжения и силу сопротивления среды.

При невозможности уменьшения угла α , т. е. при максимальном значении высоты подъема H (рис. 2) длина перемещения L не позволяет переместить ПРП в заданную точку (например,

на берег), ($L \gg H$). Для решения этой задачи предложена кинематическая схема, состоящая в разбиении всей трассы на ряд участков, каждый из которых состоит из двух этапов – этап подъема – участок трассы I (восходящий) или этап спуска – участок трассы II (нисходящий) (рис. 2).

При таком подходе вся трасса разбивается на n участков (1), что существенно увеличивает продолжительность горизонтального перемещения.

ПРП (рис. 3) состоит из следующих частей: каркаса 7, в центре которого размещен резерву-

ар высокого давления 8 со сжатым воздухом (порядка 250–300 атм); по бокам от него симметрично располагаются эластичные надувные мешки (бэги) 9, которые присоединены к резервуару 8 посредством воздушной магистрали 11, через клапаны 10. Емкость для полезной нагрузки располагается под резервуаром снизу для обеспечения лучшей устойчивости при движении. Трос 13 соединяет ПРП с узлом скольжения 6 по направляющей трассы 3. На узле скольжения располагается датчик наклона узла в пространстве.

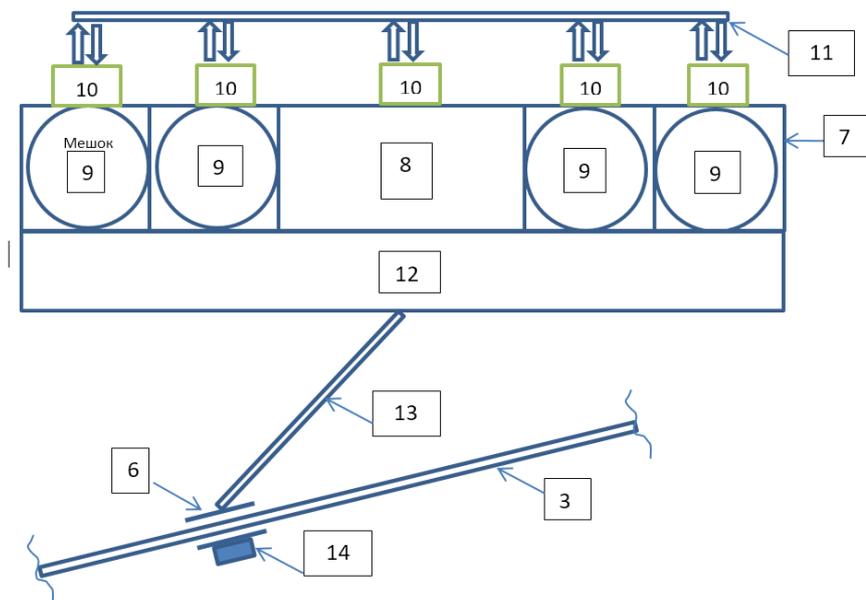


Рис. 3. Схема грузовой понтонной робототехнической платформы: 3 – направляющие; 6 – узел скольжения ПРП по направляющей; 7 – каркас устройства; 8 – резервуар высокого давления; 9 – эластичные мешки; 10 – воздушные клапаны; 11 – воздушная магистраль; 12 – емкость для полезной нагрузки с механизмами захватами крупногабаритной полезной нагрузки; 13 – трос, идущий от системы подъема до узла скольжения; 14 – датчик положения и скорости узла скольжения

Метод решения поставленной задачи

Данная система по подъему груза работает следующим образом.

В начальный момент времени, загруженная ПРП находится неподвижно в начале I этапа восходящего участка трассы. Воздушный резер-

вуар заполнен. С управляющего контроллера (на схемах не показан) подается первичный сигнал о начале движения.

Систему «резервуар – клапан – воздушный мешок» можно представить следующим образом (рис. 4).

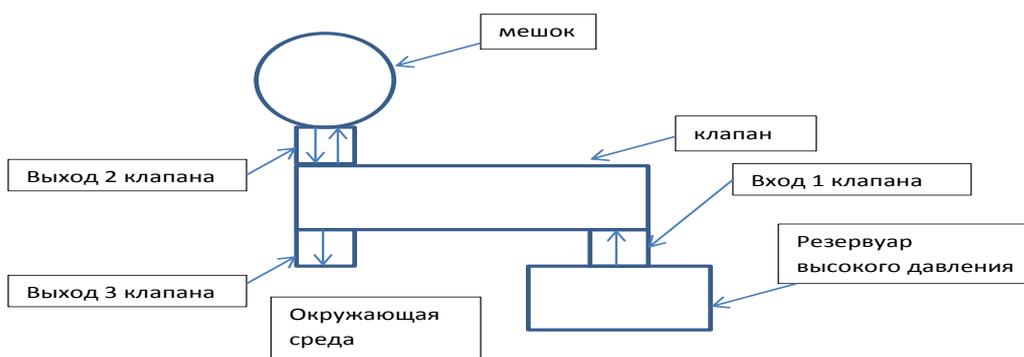


Рис. 4. Система «резервуар – клапан – воздушный мешок»

Принцип работы системы описан ниже в таблице.

№ состояния	Вход 1	Выход 2	Выход 3	Состояние
1	Открыт	Открыт	Закрыт	Из резервуара воздух попадает в воздушный мешок, мешок надувается, система приобретает положительную плавучесть, стремится всплыть вверх за счет избыточной выталкивающей силы
2	Закрыт	Открыт	Открыт	Из воздушного мешка воздух уходит в окружающую среду, мешок сдувается, система приобретает отрицательную плавучесть, стремится погрузиться вниз за счет силы тяжести
3	Закрыт	Закрыт	Закрыт	Все входы/выходы закрыты, система продолжает сохранять предыдущее заданное состояние – равномерное всплытие вверх (как максимум до верхней точки и нахождения там), либо равномерное погружение вниз (как минимум до нижней точки и нахождения там) до изменения команды
4	Открыт	Закрыт	Открыт	Экстренный сброс воздуха из резервуара в окружающую среду

Первичный сигнал поступает на клапаны управления воздушным потоком и открывает определенные входы-выходы – система принимает *состояние № 1* (см. таблицу) – воздух из резервуара с расчетной скоростью поступает в воздушный мешок. ПРП приобретает положительную плавучесть, начинает подниматься по восходящему участку и в определенный момент времени, когда система стабилизировалась по скорости подъема, управляющий контроллер подает сигнал на смену состояния – *состояние № 3* – клапан перекрывает все входы-выходы, ПРП движется равномерно вверх. В определенный момент времени (не достигнув точки максимума (перегиба)) с датчика положения и скорости поступает сигнал на контроллер, а тот, в свою очередь, подает сигнал на клапан на смену состояния – *состояние № 2* – воздух из мешка с определенной скоростью выходит в окружающую среду. ПРП начинает приобретать отрицательную плавучесть и сначала тормозит до точки максимума, а затем, при ее переходе, начинает разгоняться вниз. Далее, при достижении определенной скорости, контроллер снова переводит клапан в *состояние № 3*. Система продолжает равномерно двигаться вниз. В определенный момент времени (не достигнув точки минимума (перегиба)) с датчика положения и скорости подается сигнал на контроллер, тот, в свою очередь, подает сигнал на клапан – *состояние № 1* – воздух вновь из резервуара попадает в мешок, и ПРП сначала начинает замедлять движение вниз, а сразу при переходе точки минимума – разгонять систему вверх. И весь цикл повторяется вновь и вновь.

Количество циклов, а соответственно, и максимально пройденный путь зависит от количества и давления воздуха, накаченного в резервуар, а также от глубины погружения и массы заполненной ПРП. Чем больше глубина погружения, тем больше на одном цикле можно переместиться в горизонтальном направлении.

В общем виде указанный технический результат достигается следующим образом.

Внутри корпуса грузовой понтонной робототехнической платформы (ПРП) 1 (рис. 1) установлен резервуар 8 (рис. 3) со сжатым воздухом под большим давлением; воздух через систему клапанов 10 и воздухопроводов 11 подается в эластичные мешки 9, которые, в свою очередь, надуваясь, создают в воде подъемную силу, тянущую всю систему не только вверх, но и совершающую горизонтальное перемещение вдоль наклонно расположенного восходящего участка направляющей трассы, за счет разложения результирующей силы, действующей на ПРП, на вертикальную и горизонтальную составляющие, с которыми система соединена посредством узла сопряжения 6 (рис. 3, 4), и в конце которого предусмотрен его перегиб на нисходящий участок, позволяющий продолжить горизонтальное движение системы, но теперь уже со спущенными через клапаны 10 эластичными мешками 9, в вертикальном направлении вниз из-за получившейся отрицательной плавучести всей системы, а в дальнейшем при подходе к следующему перегибу трассы на восходящий участок весь алгоритм работы системы повторяется, обеспечивая постоянный суммарный подъем и перемещение вдоль горизонта к берегу.

Особенностью данного способа перемещения может являться и то, что движение грузов, перемещающихся на ПРП по направляющим, возможно за счет управления плавучестью.

Так, имея емкости со сжатым воздухом, можно регулировать плавучесть и осуществлять перемещение ПРП вдоль направляющих в произвольном направлении.

Имитационное моделирование

На рис. 5 представлена модель ПРТС. Проведенные эксперименты показали работоспособность системы. Так, при накачивании воздухом начинается ее подъем и продольное перемещение, она преодолевает перегиб трассы и опускается, что также сопровождается продольным перемещением.



Рис. 5. Модель транспортной системы:
1–3 – конструктивное решение; 4 – шар наполнен воздухом, ПРП всплывает;
5 – переход верхней точки, спускание воздуха; 6 – спуск ПРП

Выводы

Представленная схема подводной роботизированной транспортной системы дает возможность перемещать полезные грузы с глубины акватории по направляющим в указанную точку на поверхности только за счет применения регулируемой плавучести без использования двигателей и прочих энергетических установок за счет энергии сжатого воздуха. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного способа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ляхов, Д. Г. Современные задачи подводной робототехники // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 1. – С. 15–23.
2. Hong, S. Comparative study on tracked Vehicles on Extremely soft Cohesive soil / S. Hong, H. W. Kim, J. S. Choi //

The 5th ISO PE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. – 2002. – Pp. 132–138.

3. Чернышев, В. В. МАК-1 – подводный шагающий робот / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2(7). – С. 45–50.

4. Пат. RU 217486 U1. Двигатель для мобильной платформы / Брискин Е. С., Пеньшин И. С., Шаронов Н. Г.; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ) (RU). – № 2022133985 : заявл. 23.12.2022 : опубл. 04.04.2023 // ФИПС : [сайт]. – URL : <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=09611e742cf396060ed5d9ef337fa13>.

5. Пеньшин, И. С. Об управлении роботов-понтонных с якорно-тросовыми движителями / И. С. Пеньшин, Е. С. Брискин // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023). – 2023. – С. 201–203.

6. Гулевский, В. В. Управление ориентацией гусеничной цепи мобильных роботов с якорно-тросово-гусеничными движителями / В. В. Гулевский, Е. С. Брискин // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023). – 2023 – Т. 1. – С. 145–148.

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-60-65

*В. В. Жога, А. В. Нелюбова***ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ДИНАМИКИ МАНИПУЛЯТОРА
ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ****Волгоградский государственный технический университет**

mqdschen@yandex.ru

В работе исследуется структура кинетической энергии звена манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной пассивной связью. Расчетная схема манипулятора представляет собой четырехмассовую электромеханическую систему с четырьмя степенями свободы. Приводится методика расчета приведенного момента инерции манипулятора параллельно-последовательной структуры с поворотным основанием. Проведено исследование вклада каждого слагаемого в выражение кинетической энергии актуатора и поворотного основания.

Ключевые слова: манипулятор параллельно-последовательной структуры, кинетическая энергия, приведенный момент инерции.

*V. V. Zhoga, A. V. Nelyubova***SUBSTANTIATION OF THE COMPUTATIONAL DYNAMICS
SCHEME FOR A PARALLEL-SERIAL STRUCTURE
MANIPULATOR WITH ADDITIONAL COUPLING****Volgograd State Technical University**

The paper investigates the structure of the kinetic energy of the manipulator link of a parallel-sequential structure with an additional passive coupling. The computational scheme of the manipulator is a four-mass electromechanical system with four degrees of freedom. A method for calculating the reduced moment of inertia of a manipulator of a parallel-sequential structure with a rotating base is presented. The contribution of each term to the expression of the kinetic energy of the actuator and the rotary base has been researched.

Keywords: manipulator of parallel-sequential structure, kinetic energy, moment of inertia.

Введение

При разработке систем управления манипуляторами необходимо предварительно рассчитывать требуемые законы изменения управляющих сигналов приводных двигателей. Для этого следует сформировать динамическую модель манипулятора. При разработке динамической модели манипулятора с жесткими звеньями используются массово-геометрические параметры его звеньев. Отклонения реальных параметров манипулятора от их номинальных значений приводят к ошибкам. Поэтому аналитический синтез управляющих сигналов предъявляет повышенные требования как к адекватности модели реальной системе, так и к точности идентификации ее параметров.

Расчетная схема манипулятора

В качестве объекта исследования рассматривается манипулятор параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью [1–3]. Кинематические характеристики и реше-

ние задачи кинематического синтеза отражены в работах [4], [5], в которых рассматриваются методика решения обратной задачи кинематики манипулятора и алгоритмы определения законов изменения обобщенных координат.

Манипулятор содержит три линейных исполнительных звена (1, 2, 3), связанных с поворотным основанием в точках А, В, С с помощью двух подвижных шарниров. Другие концы исполнительных звеньев закреплены с помощью сферических шарниров на выходном звене 6. Дополнительная связь в виде полой трубы 5 обеспечивает жесткость конструкции. Изменение длины хотя бы одного звена 1, 2 или 3 способствует изменению положения выходного звена 6. Четвертый линейный привод 4 обеспечивает поворот треугольного основания вокруг горизонтальной оси.

В работе ставится задача адекватного представления модели динамики манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью.

Для описания динамической модели манипулятора принимаем, что механизм состоит из четырех твердых тел: звено AD – линейный привод (электроцилиндр), состоит из двух твердых тел – цилиндра и штока. Цилиндр совершает вращательное движение вокруг неподвижной оси, параллельной оси Ox , шток –

плоское движение. Масса цилиндра m_{41} , его момент инерции относительно оси вращения I_{41} , масса штока m_{42} , его центральный момент инерции I_{42} . Звено ABC (поворотное основание), также является твердым телом, вращающимся вокруг неподвижной оси Ox (BC). Его момент инерции относительно оси вращения – I_{0A} .

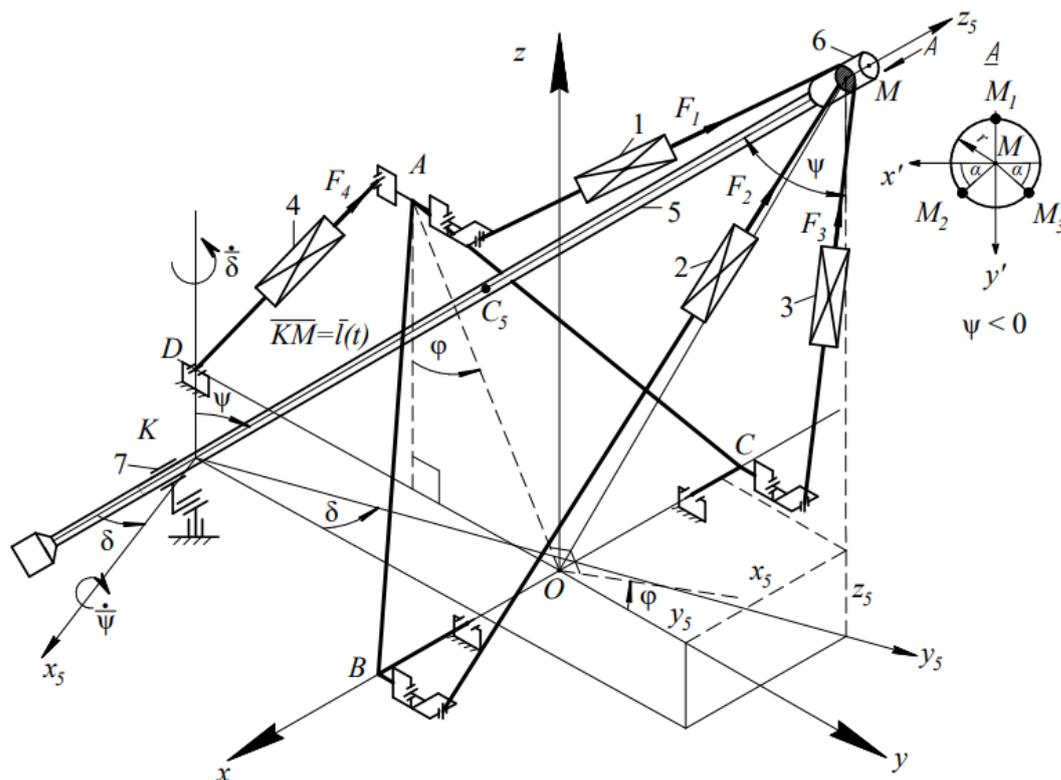


Рис. 1. Схема манипулятора-трипода с дополнительной связью

Звено KM – дополнительная пассивная связь, основа эксплуатационных свойств манипулятора – совершает пространственное движение. Масса звена KM равна m_5 , главные центральные моменты инерции I_5 .

Массово-геометрические параметры манипулятора приведены ниже в таблице. Расчет массово-геометрических параметров модели манипулятора [1] проводился в программе КОМПАС-3D.

Массово-геометрические параметры манипулятора

	Масса, кг	Момент инерции, кг·м ²	Координаты центра масс, м
Рама поворотного основания ABC	$m_{BC} = 2,03$	$I_{0A} = 0,1$ относительно оси Ox	$x_C = 0$ $y_C = 0$ $z_C = 0,18$
Корпус электроцилиндра	$m_{41} = 3,68$	$I_{41} = 0,08$ относительно оси Ox	
Шток электроцилиндра	$m_{42} = 1,11$	$I_{42} = 0,02$ относительно оси Ox	$x_C = 0$ $y_C = 0$ $z_{C04} = 0,23$
Полая труба KM	$m_5 = 6,28$	$I_5 = I_{x5} = I_{y5} = 2,06$ $I_{z5} = 0$	$z_{C05} = 1$

Механизм манипулятора имеет четыре степени свободы, и его конфигурация описывается четырьмя обобщенными координатами: длиной отрезка полой трубы $q_1 = KM$; углами $q_2 = \psi$; $q_3 = \delta$, определяющими положение подвижной системы координат $Kx_5y_5z_5$ относительно неподвижной $Oxyz$, а также угол $q_4 = \varphi$ наклона основания манипулятора. OA ; $OB = OC$; OD ; DK – геометрические параметры основания манипулятора и точек крепления на поворотном основании (рис. 1).

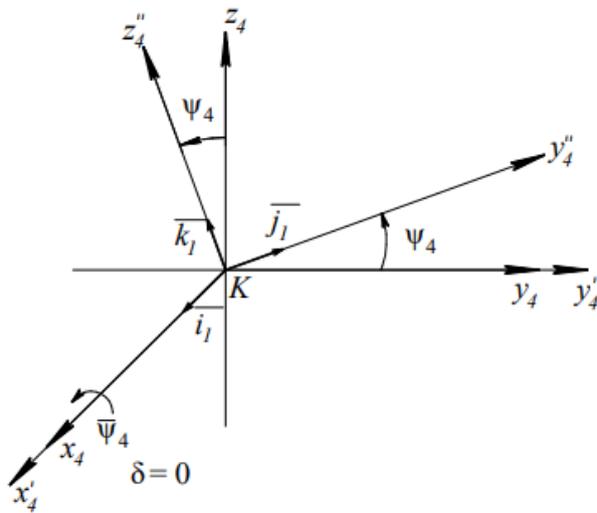


Рис. 2. Углы поворота подвижной системы исполнительного звена 4

Перемещение звеньев манипулятора происходит под действием движущих сил F_s , $s = 1, 2, 3, 4$, действующих со стороны штоков электроцилиндров (рис. 1).

Для определения пространственного положения исполнительных звеньев манипулятора вводятся системы координат – абсолютная $Oxyz$, связанная с неподвижным основанием. С исполнительным звеном 4 связана подвижная система координат $x_4y_4z_4$. Ориентация подвижной системы координат $x_4y_4z_4$ относительно абсолютной $Oxyz$ задается углом $\bar{\psi}_4$ при повороте вокруг оси x_4' (рис. 2). Отсутствует поворот вокруг оси z_4 .

Таблица направляющих косинусов для четвертого звена ($\delta = 0$) имеет вид [6]:

$$\begin{pmatrix} \alpha_{114} = 1 & \alpha_{124} = 0 & \alpha_{134} = 0 \\ \alpha_{214} = 0 & \alpha_{224} = \cos \psi_4 & \alpha_{234} = \sin \psi_4 \\ \alpha_{314} = 0 & \alpha_{324} = -\sin \psi_4 & \alpha_{334} = \cos \psi_4 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Кинетическая энергия механизма DABC

Кинетическая энергия актуатора 4 T_4 складывается из кинетической энергии корпуса актуатора при его вращательном движении вокруг неподвижной оси и кинетической энергии штока при движении вместе с корпусом и относительно корпуса (рис. 3).

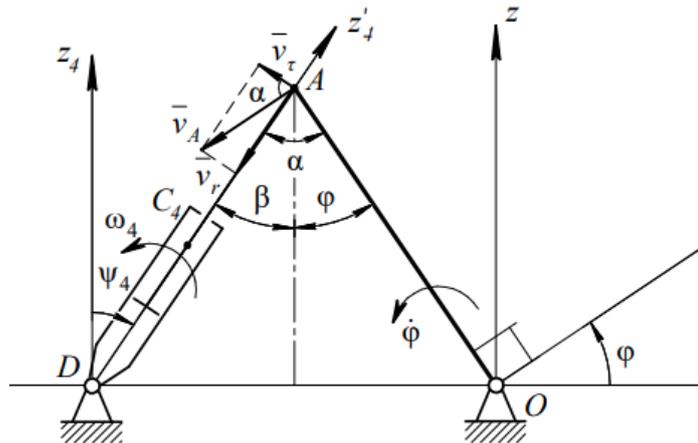


Рис. 3. Схема для определения кинетической энергии механизма DABC

Кинетическая энергия механизма складывается из кинетической энергии корпуса электроцилиндра, штока и поворотного основания ABC:

$$T_4 = T_{41} + T_{42} + T_{OA}. \quad (2)$$

Кинетическая энергия корпуса электроцилиндра

$$T_{41} = \frac{1}{2} I_{41} \omega_4^2. \quad (3)$$

Кинетическая энергия штока

$$T_{42} = \frac{1}{2} I_{42} \omega_4^2 + \frac{1}{2} m_{42} v_{C4}^2. \quad (4)$$

Кинетическая энергия поворотного основания

$$T_{OA} = \frac{1}{2} I_{OA} \dot{\varphi}^2. \quad (5)$$

Выразим ω_4 и v_{C4} через угловую скорость поворотного основания $\dot{\varphi}$.

Скорость точки A , как точки звена OA

$$v_A = \dot{\varphi} \cdot OA. \quad (6)$$

Скорость точки A , как точки звена DA

$$\bar{v}_A = \bar{v}_r + \bar{v}_\tau, \quad v_r = \dot{l}_4, \quad v_\tau = \omega_4 \cdot l_4, \quad (7)$$

где v_r – относительная скорость.

Так как

$$l_4(\varphi) = \sqrt{OA^2 + OD^2 - 2OA \cdot OD \cdot \sin \varphi},$$

то относительная скорость

$$\frac{dl_4}{dt} = \dot{l}_4 = -\frac{OA \cdot OD \cos \varphi}{l_4} \cdot \dot{\varphi}. \quad (8)$$

Из рис. 3 видно, что тангенс угла α равен

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_r}{v_\tau} = \frac{\dot{l}_4}{\omega_4 \cdot l_4}, \quad \text{откуда} \quad \omega_4 = \frac{\dot{l}_4}{l_4 \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (9)$$

Выражение для угла α имеет вид

$$\alpha = \varphi + \beta, \quad \sin \beta = \frac{OD - OA \sin \varphi}{l_4},$$

$$\beta = \arcsin \frac{OD - OA \sin \varphi}{l_4},$$

Тогда тангенс угла α , после подстановки этих выражений, имеет вид

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{\sin(\varphi + \arcsin \frac{OD - OA \sin \varphi}{l_4})}{\cos(\varphi + \arcsin \frac{OD - OA \sin \varphi}{l_4})} = \frac{OD \cdot \cos \varphi}{OA - OD \sin \varphi} \quad (10)$$

Тогда из (9), с учетом (10), получаем выражение для угловой скорости

$$\omega_4 = -\frac{OA(OA - OD \sin \varphi)}{l_4^2} \dot{\varphi}. \quad (11)$$

Кинетическая энергия механизма $DABC$ с учетом (3), (4), (5), (11)

$$T_4 = \frac{1}{2}(I_{41} + I_{42})\omega_4^2 + \frac{1}{2}m_{42}[\dot{l}_4^2 + \omega_4^2(l_4 - l_{40} + z_{C04})^2] + \frac{1}{2}I_{OA}\dot{\varphi}^2, \quad (12)$$

где $\dot{l}_4^2 + \omega_4^2(l_4 - l_{40} + z_{C04})^2 = v_{C4}^2$ – квадрат скорости центра масс штока электроцилиндра 4; координата центра масс $z_C(t) = (l_4 - l_{40} + z_{C04})$.

С учетом выражений (8) и (11) кинетическая энергия механизма $DABC$ (12)

$$T_4 = \frac{1}{2}\dot{\varphi}^2 \left\{ \begin{aligned} & \left[I_{41} + I_{42} + m_{42}(l_4 - l_{40} + z_{C04})^2 \right] \cdot \frac{OA^2(OA - OD \sin \varphi)^2}{l_4^4} + \\ & + I_{OA} + m_{42} \frac{OA^2 OD^2 \cos^2 \varphi}{l_4^2} \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

$$T_4 = \frac{1}{2}I_{np}(\varphi) \cdot \dot{\varphi}^2$$

Рассмотрим слагаемые, входящие в функцию приведенного момента инерции, и исследуем величину вклада каждого слагаемого в формулу (13).

Первое слагаемое в формуле (13) представляет собой выражение, пропорциональное квадрату угловой скорости ω_4 электроцилиндра:

$$K1(\varphi) = \left[I_{41} + I_{42} + m_{42}(l_4(\varphi) - l_{40} + z_{C04})^2 \right] \cdot \frac{OA^2(OA - OD \sin \varphi)^2}{l_4(\varphi)^4}.$$

Второе слагаемое представляет собой момент инерции рамы поворотного основания $I_{OA} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и является постоянной величиной.

с собой выражение, пропорциональное квадрату линейной скорости штока электроцилиндра:

$$K3(\varphi) = m_{42} \frac{OA^2 OD^2 \cos^2 \varphi}{l_4^2}.$$

Третье слагаемое в формуле представляет

На рис. 4 представлены графики, отражающие изменения величины каждого слагаемого от угла поворотного основания φ .

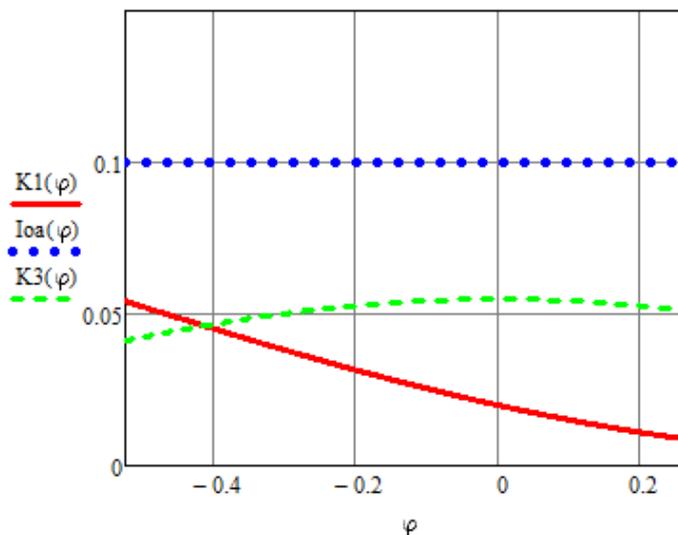


Рис. 4. Зависимость слагаемых приведенного момента инерции $I_{np}(\varphi)$ от угла поворотного основания φ

Таким образом, вклад каждого слагаемого кинетической энергии системы «электроцилиндр 4 – поворотное основание» значителен, и принимать приведенный момент инерции постоянным некорректно [7–14].

На рис. 5 представлена зависимость приведенного момента инерции $I_{np}(\varphi)$ от угла поворота φ основания ABC $-\frac{\pi}{6} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{12}$.

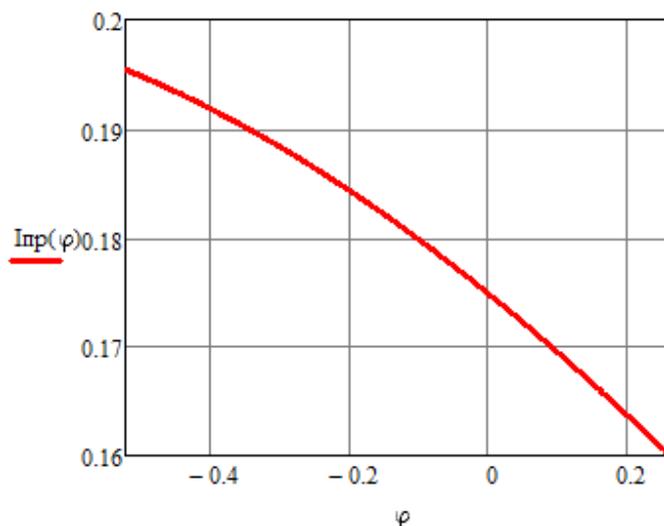


Рис. 5. График зависимости приведенного момента инерции от угла поворота основания

Зависимость (13) $I_{np}(\varphi)$ интерполируем линейной функцией $I_{np}(\varphi) \approx 0.172 - \frac{0.14}{\pi} \varphi$. Тогда выражение для кинетической энергии механизма $DABC$ принимает вид:

$$T_4 = \frac{1}{2} \left(0.172 - \frac{0.14}{\pi} \varphi \right) \cdot \dot{\varphi}^2. \quad (14)$$

Заключение

Таким образом, для адекватного представления модели динамики манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью необходимо применять уточненное выражение кинетической энергии, что позволит обоснованно использовать методы аналитического программирования входных управляющих сигналов приводных двигателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П. м. 218886 Российская Федерация, МПК В66С 23/00. Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.
2. П. м. 218887 Российская Федерация, МПК В66С 23/44. Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.
3. *Нелюбова, А. В.* Расчет кинематических характеристик манипулятора-трипода с дополнительной кинематической связью / А. В. Нелюбова, В. В. Жога, И. П. Вершинина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 71–76.
4. *Нелюбова, А. В.* Кинематический синтез манипулятора-трипода с дополнительной связью / А. В. Нелюбова, В. В. Жога, Н. Г. Шаронов // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ–2023) : материалы мультиконф. – Волгоград, 2023. – С. 89–93.
5. *Жога, В. В.* Условия управляемости манипулятора параллельно-последовательной структуры / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов // XIII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 г.) : сб. тез. В 4 т. / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого [и др.]. – СПб., 2023. – Т. 1. Общая и прикладная механика. – С. 492–494.
6. *Лурье, А. И.* Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М. : Физматгиз, 1961. – 824 с.
7. Динамика и синтез управляющих сигналов манипулятора параллельно-последовательной структуры / В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин //

Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 8(749). – С. 3–12.

8. *Коловский, М. З.* Основы динамики промышленных роботов / М. З. Коловский, А. В. Слоущ. – М. : Наука, 1988. – 239 с.
9. Исследование манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода : моногр. / Н. С. Воробьева, И. А. Несмиянов, В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, А. В. Дяшкин. – Волгоград : Волгоградский ГАУ, 2022. – 272 с.
10. О неустойчивых режимах работы электропривода манипулятора / И. А. Несмиянов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 3. – С. 18–25.
11. *Борисов, И. И.* Имитационное моделирование мехатронных систем / И. И. Борисов, С. А. Колубин. – СПб. : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2020. – 103 с.
12. *Добриборщ, Д.* Адаптивное управление роботом-манипулятором с параллельной кинематической схемой / Д. Добриборщ, С. А. Колубин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 9. – С. 850–857.
13. *Хейло, С. В.* Манипуляционные механизмы параллельной структуры: структурный синтез, кинематический и силовой анализ / С. В. Хейло, В. А. Глазунов, С. В. Палочкин. – М. : МГТУ, 2011. – 153 с.
14. *Дяшкин-Титов, В. В.* Математическая модель динамики шестимассовой системы механизма манипулятора параллельной структуры / В. В. Дяшкин-Титов, Н. С. Воробьева, В. В. Жога // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(256) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – С. 32–37.

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5
DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-65-71

А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин

**ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
СО СМЕЩЕНИЕМ ИСХОДНОГО ЦЕНТРА
ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ СТАТИЧНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ**

Волгоградский государственный технический университет

artkoshman@gmail.com, alexanderbs00@mail.ru, alex-leonard@yandex.ru, au@vstu.ru

В статье рассматривается подход по планированию движения мобильного робота со смещением центра потенциального поля статичного препятствия, позволяющий исключить возможность возникновения колебаний центра масс мобильного робота.

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

A. M. Koshman, A. S. Bykov, A. V. Leonard, V. A. Shurygin

**MOTION PLANNING OF A MOBILE ROBOT WITH A DISPLACEMENT
OF AN INITIAL CENTER OF THE POTENTIAL FIELD OF A STATIC OBSTACLE**

Volgograd State Technical University

The article considers an approach to planning the movement of a mobile robot with a displacement of the center of the potential field of a static obstacle, which eliminates the possibility of fluctuations of a mobile robot.

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

Введение

Для планирования движения мобильных роботов применяются различные методы локального и глобального планирования, отличающиеся своей эффективностью [1, 2]. При реализации алгоритма планирования движения робота (основанного на подходе, предложенном в статьях [3, 4]) могут возникать колебания центра масс робота, негативно влияющие на достижение роботом целевой точки за отведенное время. Колебания центра масс мобильного робота происходят, когда вектор скорости центра масс робота, центр препятствия и целевая точка лежат на одной прямой. С увеличением углового отклонения вектора скорости от указанной прямой вероятность возникновения ко-

лебаний уменьшается. Предлагаемый подход позволяет исключить возникновение колебаний робота вблизи препятствия, что расширяет область применения указанного метода [3].

Постановка задачи

Необходимо получить условия и алгоритм смещения исходного центра потенциального поля статического препятствия для его обхода роботом в 2D-пространстве. Движение мобильного робота происходит из начальной точки G в конечную точку F , в которую необходимо попасть за отведенное время τ с начальными и конечными условиями: $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0$ и $x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau$ (рис. 1).

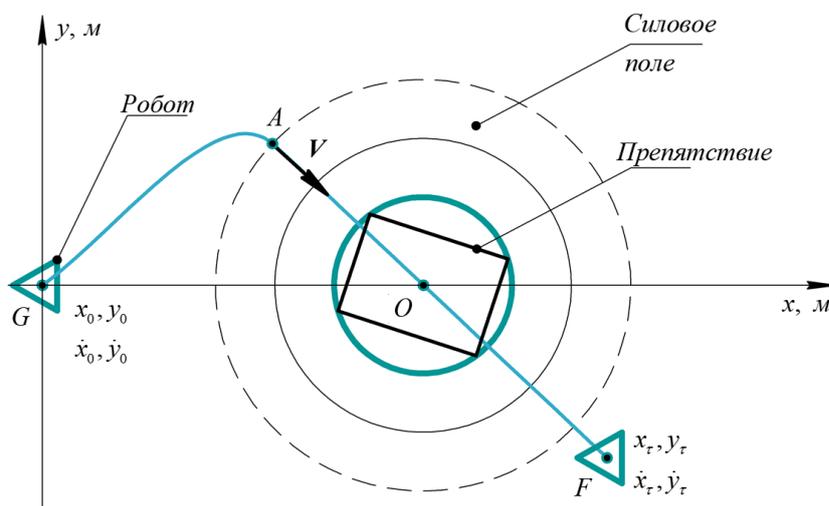


Рис. 1. Постановка задачи

Вектор скорости центра масс робота V , центр статического препятствия (т. O) и целевая точка (т. F) лежат на одной прямой (AF).

При этом полагается, что робот способен реализовать любую траекторию движения его центра масс как угодно быстро (робот обладает идеальной маневренностью).

Сканирующее устройство получает и обрабатывает информацию о препятствиях мгновенно и в полном объеме (на заданном удалении).

Теоретическое обоснование смещения поля

В процессе движения мобильного робота в зоне действия потенциального поля r_0 на него воздействует виртуальная пружина с жесткостью c (рис. 2). Данное воздействие позволяет роботу (радиусом R) избежать столкновения с препятствием (радиусом R_0), при соответствующем выборе параметра поля c (жесткости виртуальной пружины) на основе условия безударного обхода [3]. Направление силы F действия виртуальной пружины противоположно радиальной составляющей V_{\parallel} вектора скорости V робота.

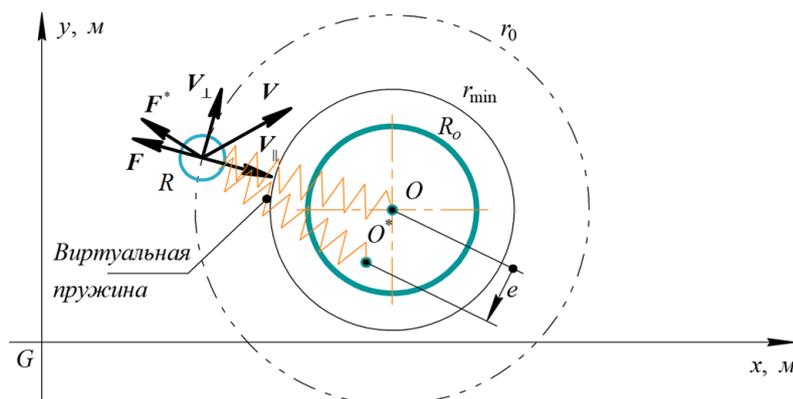


Рис. 2. Воздействие виртуальной пружины на робот

Смещение центра поля на расстояние e позволяет изменить направление отталкивающей силы (F^*), что оказывает влияние на траекторию движения центра масс робота. Чем больше смещение e , тем больше будет отклонение центра масс робота от прямой (AF , рис. 1), вдоль которой происходили колебания робота.

Пример алгоритма смещения поля

Алгоритм смещения центра поля препятствия состоит из пяти этапов: 1-й – проверка пересечения аналитической траектории робота опасной зоны (r_{min} , рис. 2) вокруг препятствия для последующего определения направления смещения; 2-й – определение направления смещения центра поля; 3-й – расчет значения максимального смещения e_{max} центра поля; 4-й – расчет коэффициента смещения k_d ; 5-й – определение фактического смещения e центра поля.

Этап «1». Аналогично алгоритму планирования движения, предложенному в статьях [3–5], при обнаружении роботом препятствия производится проверка пересечения аналитической траекторией робота внутренней границы поля r_{min} (рис. 2). Данная проверка требуется как для

определения момента включения потенциального поля (исключающего столкновение робота с препятствием), так и для определения направления смещения центра потенциального поля (при его включении).

Этап «2». Смещение центра поля препятствия производится по направлению (hh , рис. 3), перпендикулярному вектору скорости V . Координаты (x_o^*, y_o^*) смещенного центра (т. O^*) поля вдоль осей x и y определяются из условий (1):

$$\begin{cases} x_o^* = x_o + e \cdot \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) \\ y_o^* = y_o + e \cdot \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}, y > y_o$$

$$\begin{cases} x_o^* = x_o + e \cdot \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \\ y_o^* = y_o + e \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}, y \leq y_o$$

где x, y – координаты центра масс робота в момент его пересечения границы r_{min} (при пробной попытке обхода препятствия); x_o, y_o – координаты центра исходного потенциального поля.

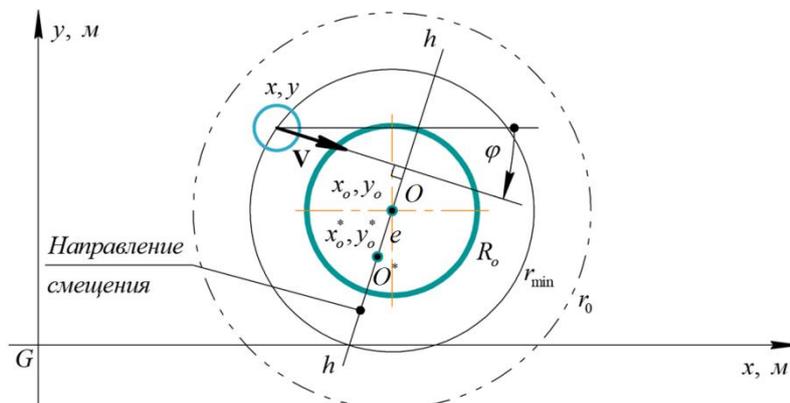


Рис. 3. Направление смещения центра поля препятствия

Этап «3». Максимально возможное смещение ограничено условием определения размеров границ потенциального поля $r_0 > r_{\min}$. Однако при уменьшении глубины поля ($r_0 - r_{\min}$) наблюдается рост параметра поля c , и как следствие – рост ускорений робота и потребных мощностей его привода [6]. Предлагается определять размеры r_0^* , r_{\min}^* нового поля исходя из выражений (2):

$$\begin{cases} r_0^* = \sqrt{r_0^2 + e_{\max}^2}; \\ r_{\min}^* = r_{\min} + e_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где r_0^* – радиус внешней границы смещенного поля препятствия; r_{\min}^* – радиус внутренней границы смещенного поля препятствия.

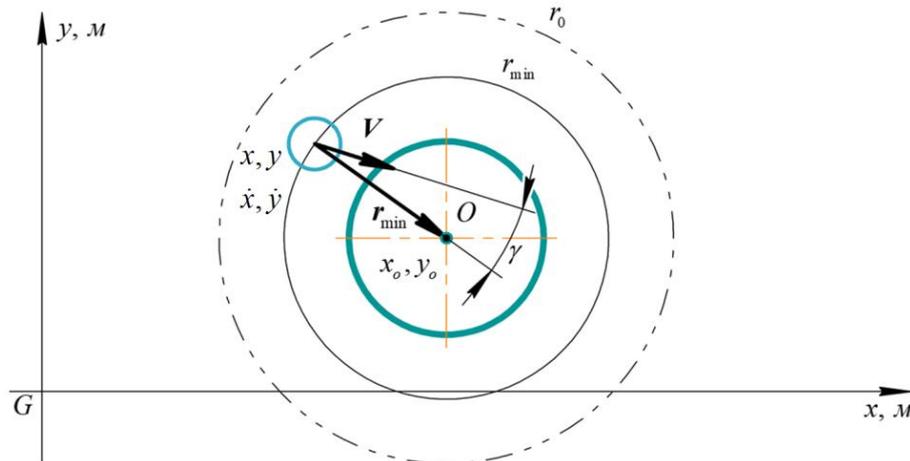


Рис. 4. Определение коэффициента смещения

Минимальное (0) и максимальное (1) значения данного коэффициента соответствуют ситуациям, когда робот движется по касательной к внутренней границе поля ($k_d = 0$, смещение не требуется), и когда робот движется к центру препятствия ($k_d = 1$, смещение должно быть максимальным $e = e_{\max}$). Расчет значения коэффициента смещения поля производится по формуле (4):

$$k_d = \cos \gamma = \frac{(\mathbf{V}, \mathbf{r}_{\min})}{|\mathbf{V}| \cdot |\mathbf{r}_{\min}|} = \frac{\dot{x} \cdot (x_o - x) + \dot{y} \cdot (y_o - y)}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \cdot \sqrt{(x_o - x)^2 + (y_o - y)^2}}. \quad (4)$$

Этап «5». На заключительном этапе производится расчет фактического смещения центра поля с учетом коэффициента смещения k_d , определе-

Приравнивая формулы (2) и добавляя корректирующий параметр поля Δr (задаваемый экспертно) в виде дополнительного слагаемого второй формулы (2), значение максимального смещения e_{\max} можно определить из формулы (3):

$$e_{\max} = (r_0^2 - r_{\min}^2 - \Delta r^2 - 2 \cdot r_{\min} \cdot \Delta r) / [2(r_{\min} + \Delta r)]. \quad (3)$$

Этап «4». Расчет коэффициента смещения k_d производится для определения фактического смещения поля. Значение данного коэффициента принадлежит диапазону $[0 \dots 1]$. За коэффициент смещения поля принимается косинус угла γ между вектором скорости центра масс робота \mathbf{V} и радиус-вектором \mathbf{r}_{\min} , проведенным из центра масс робота к центру препятствия (рис. 4).

ние координат центра (x_o^*, y_o^*) и параметров (r_0^*, r_{\min}^*) смещенного потенциального поля (5):

$$\begin{cases} x_o^* = x_o + e_{\max} k_d \sin(\varphi) \\ y_o^* = y_o - e_{\max} k_d \cos(\varphi), & y > y_o \\ x_o^* = x_o - e_{\max} k_d \sin(\varphi) \\ y_o^* = y_o + e_{\max} k_d \cos(\varphi), & y \leq y_o \end{cases} \quad (5)$$

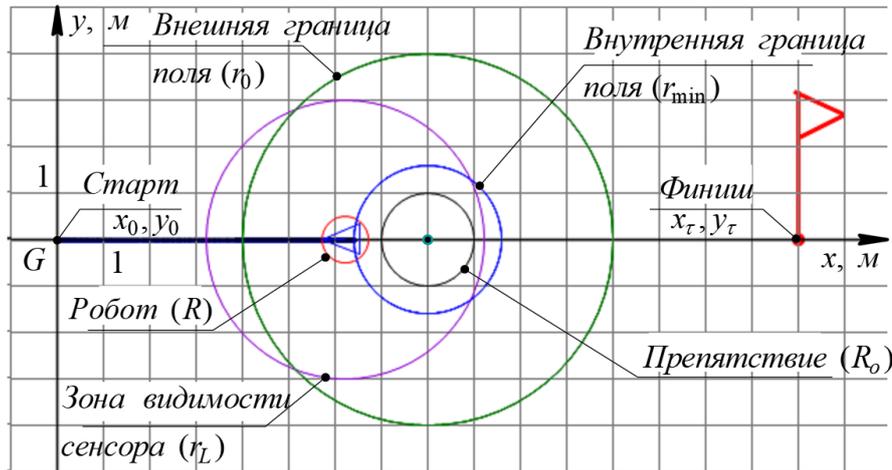
$$r_0^* = \sqrt{r_0^2 + (e_{\max} k_d)^2}, \quad r_{\min}^* = r_{\min} + e_{\max} k_d.$$

Компьютерное моделирование

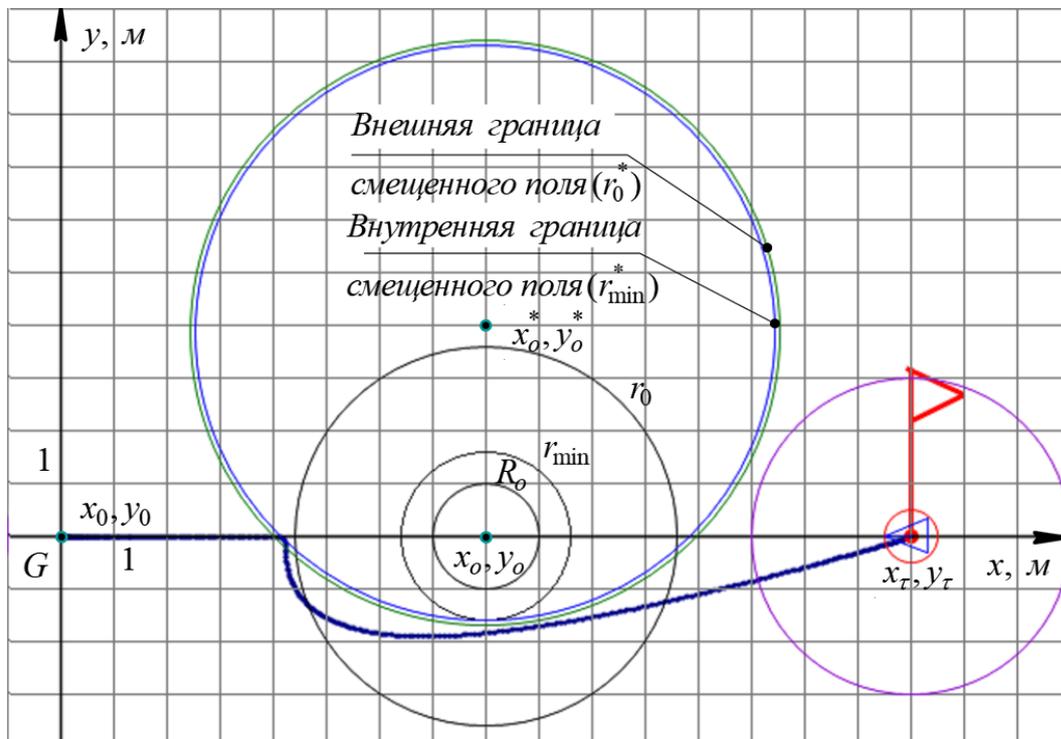
Для проверки работоспособности предлагаемого подхода был модифицирован ранее разработанный программный инструмент моделирования движения мобильного робота в 2D-пространстве [5]. Для серии численных экс-

периметров (рис. 5, 6) были приняты постоянными следующие параметры: параметры робота ($R=0,5$ м; $m=1$ кг; $r_L=3$ м; $k_a=1$ кг·с²; $k_\varepsilon=1$ кг·м²) и параметры времени ($t_0=0$ с;

$\tau=5$ с; $dt=0,01$ с). В численных экспериментах сравнивались результаты обхода статического препятствия на основе алгоритма без смещения исходного поля и со смещением.

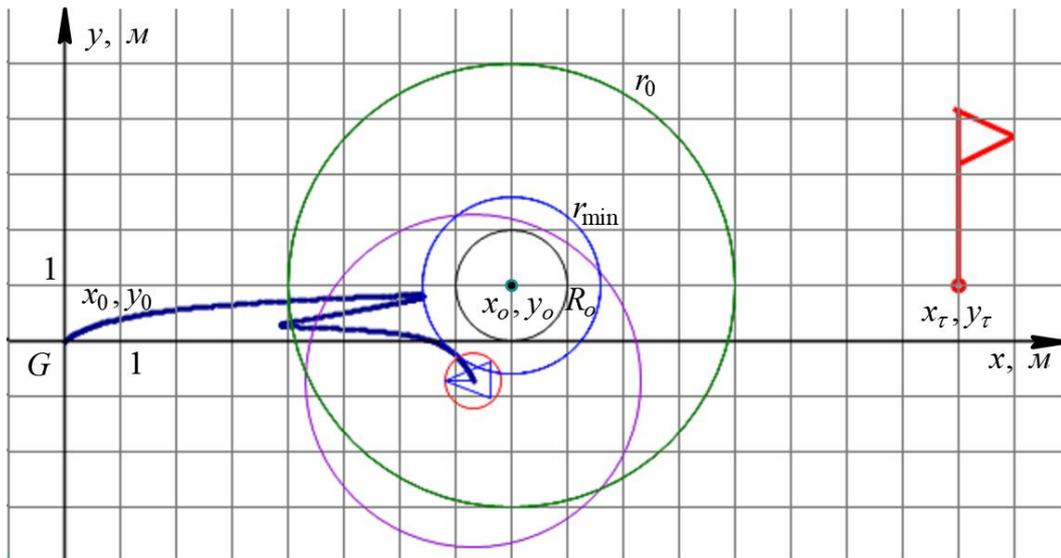


а) движение без смещения поля

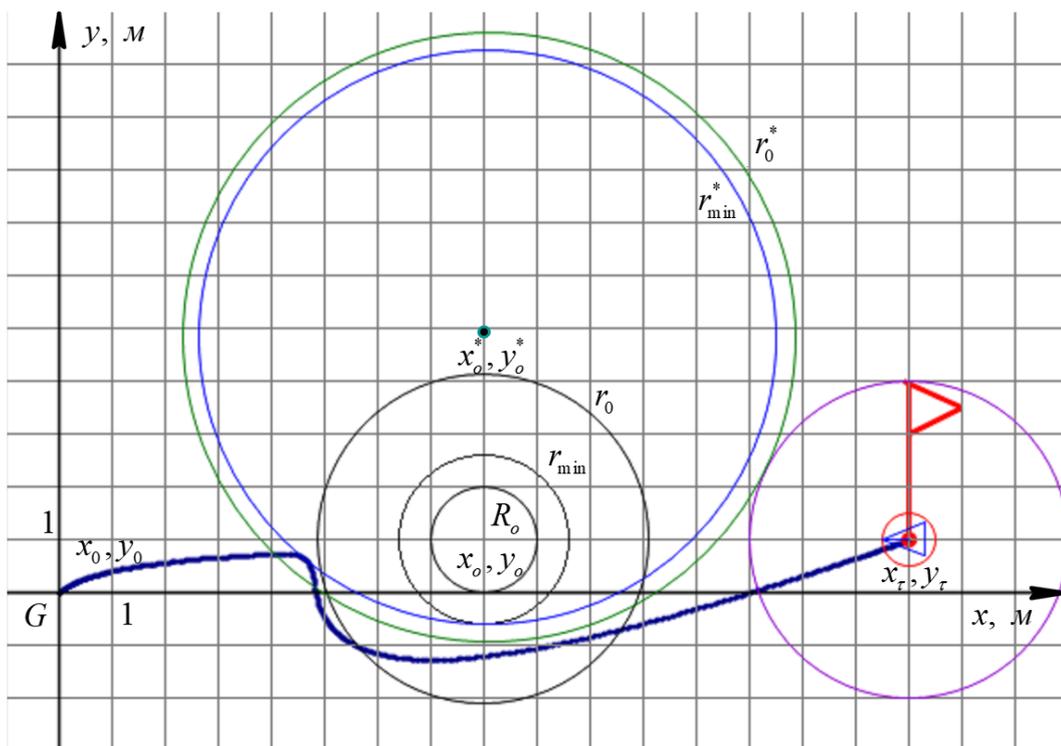


б) движение со смещенным полем

Рис. 5. Движение робота при нулевых начальных и конечных линейных скоростях, $y_0 = y_\tau = y_o = 0$



а) движение без смещения поля



б) движение со смещенным полем

Рис. 6. Движение робота при ненулевых начальных и конечных линейных скоростях
 $y_0 = 0$; $y_\tau = y_n = 1$ м

Заключение

Анализ результатов компьютерного моделирования показывает, что при экстремальных условиях движения робота (когда вектор скорости центра масс робота, центр препятствия и целевая точка лежат на одной прямой или близко к ней) предлагаемый подход планирования движения робота со смещением поля по-

зволяет обеспечить обход одного статичного препятствия за отведенное время без колебаний центра масс робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chunxi Cheng, Path planning and obstacle avoidance for AUV : A review / Chunxi Cheng, Qixin Sha, Bo He, Guangliang // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 235. Article 109355.

2. 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.

3. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_T^1$). Ч. 1. Теория // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 34–42.

4. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_T^1$). Ч. II. Результаты /

А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 42–48.

5. Кошман, А. М. Планирование движения наземного робота с учетом его 2D-пространственной ориентации и обходом одного статичного препятствия / А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 51–57.

6. Леонард, А. В. Особенности планирования движения наземного робота с обходом стационарного препятствия на основе подхода $VC/APF+BC_T^1$ / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (280) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 32–40.

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-71-75

А. В. Нелюбова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ТОЧНОСТЬ АППРОКСИМАЦИИ ПРОГРАММНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПРИВОДОВ МАНИПУЛЯТОРА-ТРИПОДА

Волгоградский государственный технический университет

mqschen@yandex.ru

Рассматривается проблема влияния количества заданных граничных условий на степень аппроксимирующего полинома при решении задачи перемещения по выбранной траектории манипулятора-трипода методом кинематического синтеза перемещений исполнительных приводов.

Ключевые слова: манипулятор-трипод, кинематический синтез, граничные условия, степень аппроксимирующего полинома.

A. V. Nelyubova

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF BOUNDARY CONDITIONS ON THE ACCURACY OF APPROXIMATION OF PROGRAM MOVEMENTS OF THE ACTUATORS OF THE MANIPULATOR-TRIPOD

Volgograd State Technical University

The problem of the influence of the number of specified boundary conditions on the degree of the approximating polynomial in solving the problem of moving along the selected trajectory of a tripod manipulator by the method of kinematic synthesis of movements of actuators is considered.

Keywords: manipulator-tripod, kinematic synthesis, boundary conditions, degree of approximating polynomial.

Введение

Широкое применение манипуляторов-триподов в различных отраслях промышленности позволяет разрабатывать новые методы для обеспечения оптимального управления и повышения качественных характеристик таких структур. Одной из основных задач при синтезе алгоритмов управления манипуляторов является задача кинематического синтеза программных перемещений исполнительных приводов, обеспечивающих перемещение характерной точки выходного звена манипулятора по заранее спланированной траектории [1, 2]. Для решения за-

дачи кинематического синтеза разработано несколько методов [3, 4]. Одним из методов синтеза перемещений исполнительных приводов является метод аппроксимации реперных точек полиномом. Его суть состоит в предварительном расчете промежуточных значений обобщенных координат для каждого звена между последовательными конфигурациями манипулятора и последующей аппроксимации этих значений полиномом. Степень полинома при необходимой точности аппроксимации зависит от вида и количества граничных условий, наложенных на программную траекторию выходного звена.

Постановка задачи

Рассматривается манипулятор-трипод [5, 6], характерная точка выходного звена M которого совершает движение по окружности из заданной начальной точки в конечную (рис. 1). Манипулятор содержит три линейных исполнительных звена ($1, 2, 3$), связанных с поворотным основанием в точках A, B, C с помощью двух подвижных шарниров. Другие концы исполнительных звеньев закреплены с помощью сферических шарниров на выходном звене 6 . Дополнительная геометрическая связь в виде полой трубы 5 воспринимает изгибающие моменты и обеспечивает жесткость конструкции. Изменение длины хотя бы одного звена $1, 2$ или 3 способствует изменению геометрии простран-

ственной структуры, представленной в виде пирамиды $MAVC$. Четвертый линейный привод 4 обеспечивает поворот треугольного основания вокруг горизонтальной оси. Манипулятор имеет четыре степени подвижности.

При решении задачи кинематического синтеза перемещений исполнительных приводов методом составления сплайн-функции, применяемой для планирования траекторий и оптимизационного решения задач о положениях [7], необходимо обосновать рациональный выбор степени аппроксимирующего полинома в зависимости от количества заданных граничных условий перемещения выходного звена манипулятора за конечное время с необходимой точностью.

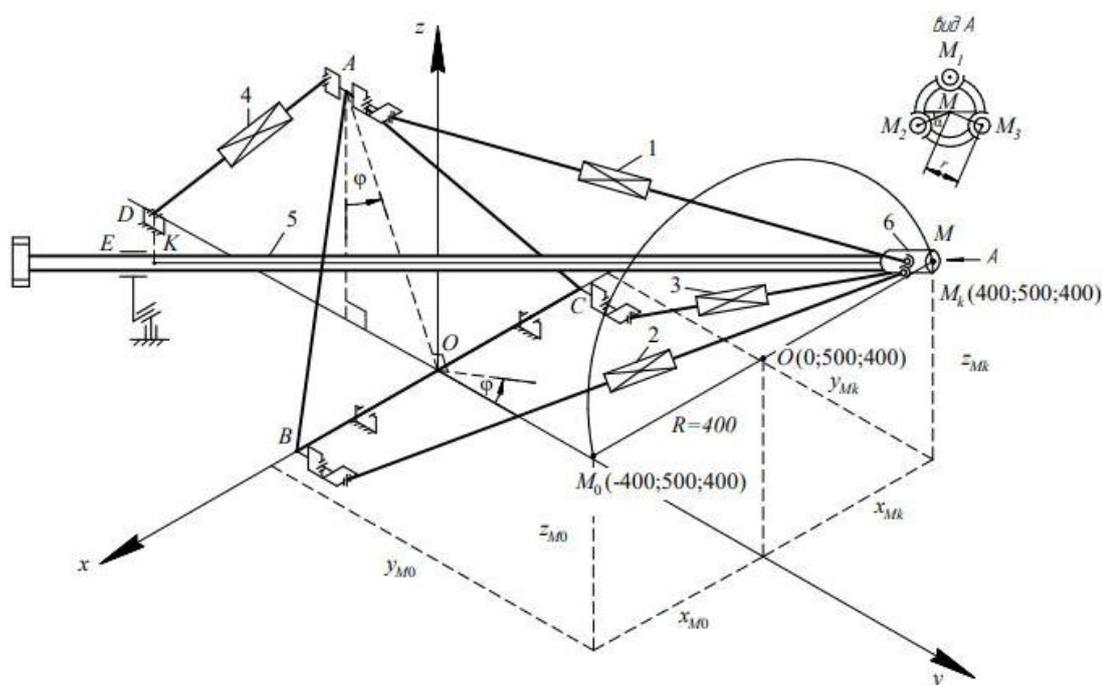


Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора-трипода с дополнительной связью

Метод решения и результаты

На примере перемещения по окружности выходного звена манипулятора-трипода с дополнительной пассивной связью [7] исследуется влияние количества заданных граничных условий и степени аппроксимирующего полинома на максимальные отклонения значений обобщенных координат от исходных. В качестве обобщенных координат манипулятора принимаем длины исполнительных звеньев $l_k(t)$, $k = 1, 2, 3, 4$. В соответствии с применяемым методом задаем время $T = 8$ с перемещения захвата по траектории [7]; траекторию разбиваем на $m = 16$ отрезков через интервалы времени

$\Delta t = 0,5$ с. Для каждой точки на траектории с координатами $x(t_i), y(t_i), z(t_i)$, решением задачи позиционирования [8, 9], находим последовательность значений обобщенных координат $l_k(t_i)$. В качестве граничных условий принимаются значения обобщенных координат, скорости и ускорений в начальный и конечный моменты времени. Исследуются случаи аппроксимации траектории полиномами со степенями $n = 5, 7, 9, 11$, так как для того, чтобы система линейных уравнений, получаемых при применении метода точечной квадратичной аппроксимации [10], имела единственное решение, необходимо выполнение неравенства $n \leq m$.

Значения и количество граничных условий задаются в зависимости от требований выполняемой технологической операции.

Рассматривается влияние четырех вариантов граничных условий на максимальные отклонения значений аппроксимирующих полиномов от расчетных значений.

В первом случае граничные условия отсутствуют; во втором случае заданы только значения обобщенных координат в начальный и конечный моменты времени; в третьем случае заданы значения обобщенных координат и скоро-

стей в начальный и конечный моменты времени; в четвертом случае заданы обобщенные координаты, скорости и ускорения в начальный и конечный моменты времени. Для каждой обобщенной координаты формируются полиномы 5-, 7-, 9-, 11-й степени. Сравниваются максимальные отклонения значений полиномов с расчетными значениями, полученными при решении задачи позиционирования. На рис. 2–5 показаны значения максимальных отклонений обобщенных координат $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4$ в зависимости от степени полинома и числа граничных условий.

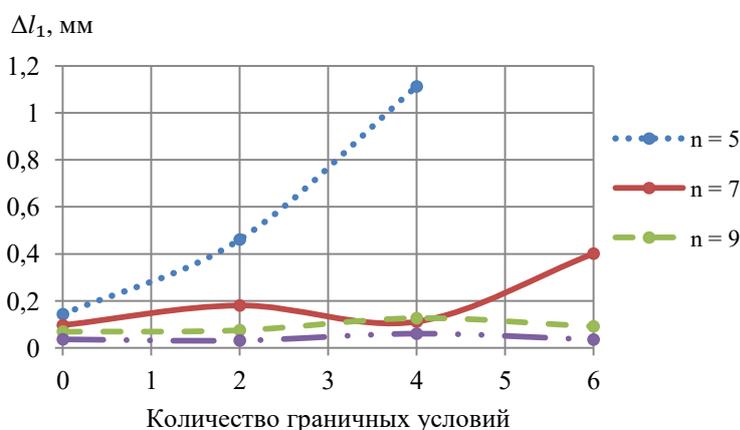


Рис. 2. График зависимости значений максимальных отклонений обобщенной координаты Δl_1 от степени полинома и числа граничных условий

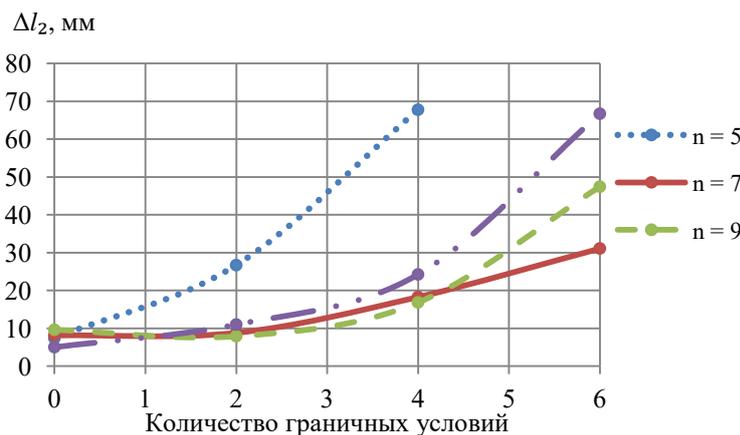


Рис. 3. График зависимости значений максимальных отклонений обобщенной координаты Δl_2 от степени полинома и числа граничных условий

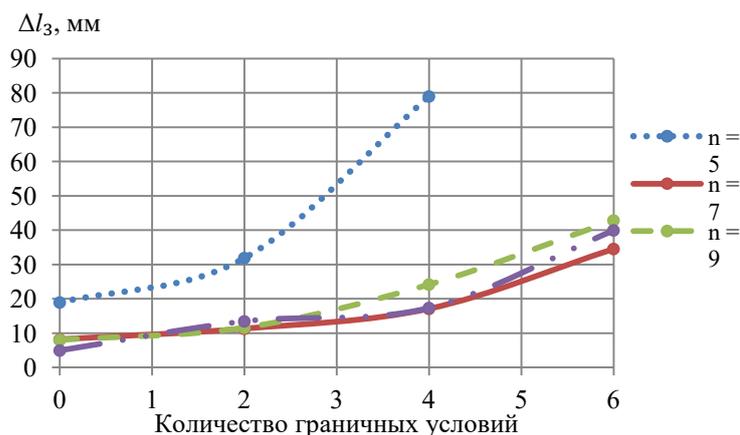


Рис. 4. График зависимости значений максимальных отклонений обобщенной координаты Δl_3 от степени полинома и числа граничных условий

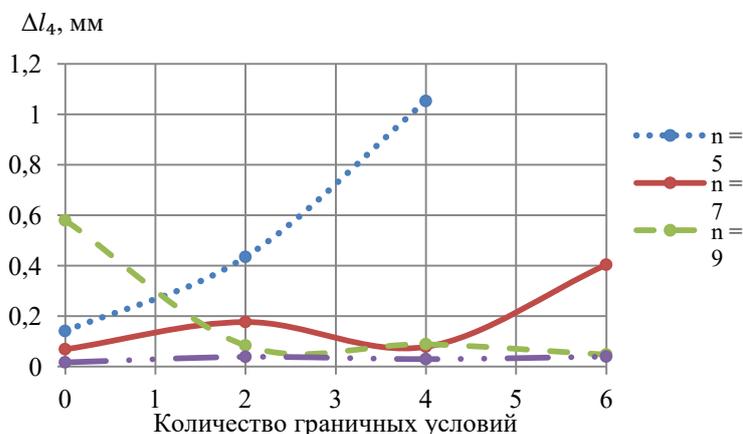


Рис. 5. График зависимости значений максимальных отклонений обобщенной координаты Δl_4 от степени полинома и числа граничных условий

Заключение

Результаты математического моделирования показывают, что при отсутствии граничных условий для обеспечения необходимой точности аппроксимации ($\delta = 0,01$) достаточно применять полином 5-й степени. При учете шести граничных условий наименьшие максимальные отклонения наблюдаются при аппроксимации траектории полиномом 11 степени. При использовании полинома 5-й степени зависимость точности аппроксимации от количества граничных условий носит немонотонный характер. Максимальные отклонения наблюдаются при меньшей степени полинома. Таким образом, при решении задачи кинематического синтеза следует выбирать степень полинома высокого порядка с учетом ограничений $n \leq t$ для увеличения точности полученных результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сяньвэнь, Кун. Структурный синтез параллельных механизмов / Сяньвэнь Кун, Клемент Госселин. – М. : Физматлит, 2012. – 275 с.
2. Синтез механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой / Н. Ю. Носова, В. А. Глазунов, С. В. Палочкин, А. Н. Терехова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 5. – С. 34–40.
3. Исследование манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода : моногр. / Н. С. Воробьева, И. А. Несмиянов, В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, А. В. Дяшкин ; Волгоградский ГАУ. – Волгоград, 2022. – 272 с.
4. Рыбак, Л. А. Синтез алгоритма коррекции траектории движения выходного звена робото-гексапода на основе теории искусственных нейронных сетей / Л. А. Рыбак, Ю. А. Мамаев, Л. Г. Вирабян // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 12. – С. 142–151.
5. П. м. 218886 Российская Федерация, МПК В66С 23/00. Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев ; ВолГТУ. – 2023.

6. П. м. 218887 Российская Федерация, МПК В66С 23/44. Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев ; ВолгГТУ. – 2023.

7. *Нелюбова, А. В.* Кинематический синтез манипулятора-трипода с дополнительной связью / А. В. Нелюбова, В. В. Жога, Н. Г. Шаронов // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : Материалы мультиконференции. – Волгоград, 2023. – С. 89–93.

8. *Нелюбова, А. В.* Расчет кинематических характеристик манипулятора-трипода с дополнительной кинематической связью / А. В. Нелюбова, В. В. Жога, И. П. Вершина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 71–76.

9. *Жога, В. В.* Определение кинематических параметров исполнительных приводов для реализации программных траекторий / В. В. Жога, А. В. Нелюбова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (280) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 26–30.

10. *Демидович, Б. П.* Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения : учеб. пособие / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. – СПб.: Лань. – 2022. – 400 с.

УДК 62-529.4+629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-75-81

А. С. Прокопов, Е. С. Брискин

О ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДВУХСЕКЦИОННОГО РОБОТА*

Волгоградский государственный технический университет

proas98@mail.ru, dtm@vstu.ru

Рассматривается движение робота, состоящего из двух секций, связанных между собой стержнем переменной длины, шарнирно закрепленным в центре масс каждой из секций. Переменность длины стержня обеспечивается работой актуатора.

Каждая из секций робота непрерывно взаимодействует с плоской горизонтальной поверхностью шаровыми опорами, обеспечивающими минимальность сил сопротивления движению. На секциях симметрично установлены четыре управляемые тормозные опоры, обеспечивающие в определенные моменты времени надежный контакт с поверхностью. Каждая из секций может совершать вращательное движение вокруг соответствующей тормозной опоры.

Ключевые слова: двухсекционные роботы, голономная связь, тормозные стойки.

A. S. Prokopov, E. S. Briskin

ABOUT THE POSITIONING ACCURACY OF A TWO-SECTION ROBOT

Volgograd State Technical University

The motion of a robot consisting of two sections and interconnected by a rod of variable length pivotally fixed in the center of mass of each sections is considered. The variable length is ensured by the operation of the actuator.

Each of the sections of the robot continuously interacts with a flat horizontal surface with ball bearings, which ensure a minimum of resistance forces to movement. Four controllable brake supports are symmetrically installed on the sections, ensuring reliable contact with the support surface at certain points in time. In this case, each of the sections can rotate around the corresponding brake support.

Keywords: two-section robots, holonomic communication, brake racks.

Введение

Известные мобильные роботы могут состоять как из одного твердого тела, на котором размещены движители, энергетические установки, исполнительные механизмы и так далее, так из систем сочлененных твердых тел [1]. В качестве движителей могут быть использованы традиционные колесные и гусеничные [2], а также шагающие, обладающие преимуществом по профильной и опорной проходимости

[3–6]. К шагающеподобным движителям можно отнести и движители, обеспечивающие периодическое заклинивание на цилиндрической опорной поверхности [7].

Рассматривается двухсекционный робот, перемещающийся по горизонтальной шероховатой поверхности за счет работы актуатора. На каждом из этапов одна секция неподвижна за счет взаимодействия всех тормозных опор с опорной поверхностью, а другая может пово-

© Прокопов А. С., Брискин Е. С., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

рачиваться вокруг одной из опор. Остальные опоры на этой секции свободно перемещаются по опорной поверхности.

Таким образом, движение двухсекционного робота осуществляется в соответствии с алгоритмом последовательной работы приводов:

тормозных на каждой из платформ и привода актуатора (рис. 1).

Нумерация опор для каждой платформы двухсекционного робота начинается с левой верхней опоры по часовой стрелке. Нумерация платформ идет слева направо.

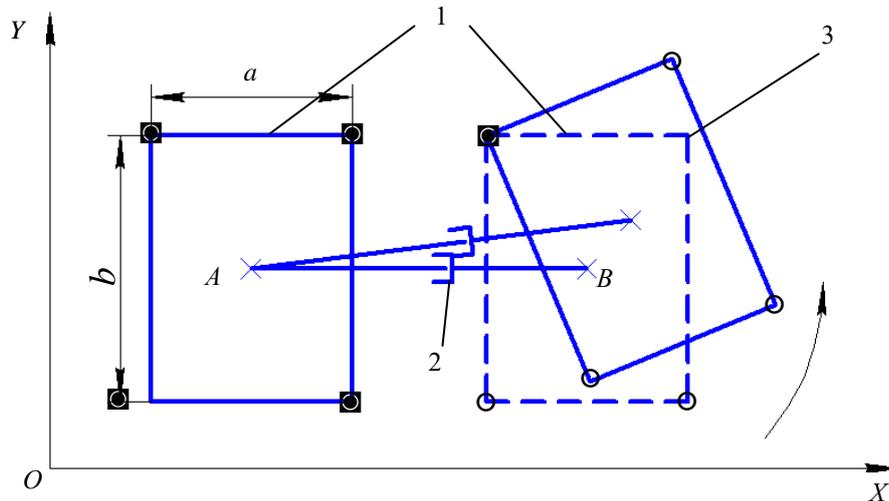


Рис. 1. Кинематическая схема двухсекционного робота:
 A, B – точки закрепления стержней на роботах; 1 – платформы двухсекционного робота;
 2 – актуатор; 3 – тормозные управляемые опоры: ■ – заторможенные; ○ – свободные

Постановка задачи

Рассматриваются методы управления двухсекционным роботом, обеспечивающие в среднем поступательное движение каждой из секций с прямолинейным движением их центров масс и оценкой отклонений их движения от программного режима.

Управление роботом

Движение робота заключается в последовательной работе актуатора, обеспечивающего изменение расстояния между центрами масс каждой из секций с торможением одной из опор на перемещаемой секции и торможением всех опор на неподвижной секции.

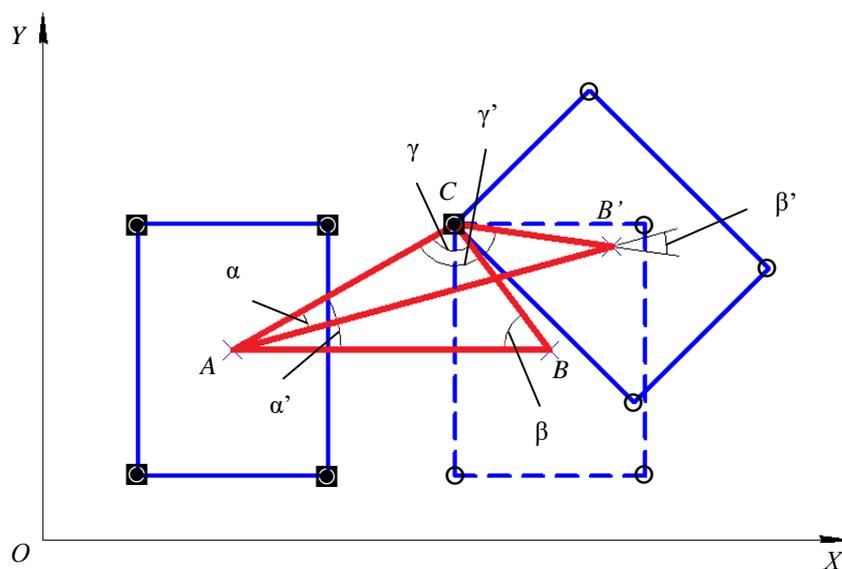


Рис. 2. Основные размеры для вычисления следующего положения

На рис. 1 приведен пример поворота вокруг первой опоры на второй перемещаемой платформе при работе актуатора с целью увеличения длины AB .

На рис. 2 представлена геометрическая схема, необходимая для вычисления следующего положения подвижной платформы: исходная длина актуатора $AB = L$; расстояние от центра неподвижной платформы до фиксированной опоры подвижной платформы – AC ; от фиксированной опоры подвижной платформы до центра подвижной платформы – CB ; углы α, β, γ треугольника, образованного длинами AB, AC и CB . Для следующего положения: длина актуатора AB' ; расстояние от центра неподвижной платформы до фиксированной опоры подвижной платформы – AC , от фиксированной опоры подвижной платформы до центра подвижной платформы – CB' ; углы α', β', γ' треугольника, образованного длинами AB', AC и CB' .

При торможении одной из опор перемещаемой секции можно определить углы до начала изменения длины актуатора в соответствии с формулами:

$$\alpha = \frac{AC^2 + AB^2 - CB^2}{2 \cdot AC \cdot AB}, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{CB^2 + AB^2 - AC^2}{2 \cdot AB \cdot CB}, \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{AC^2 + CB^2 - AB^2}{2 \cdot AC \cdot CB}. \quad (3)$$

После изменения длины актуатора определяются новые углы:

$$\alpha' = \frac{AC^2 + AB'^2 - CB'^2}{2 \cdot AC \cdot AB'}, \quad (4)$$

$$\beta' = \frac{CB'^2 + AB'^2 - AC^2}{2 \cdot AB' \cdot CB'}, \quad (5)$$

$$\gamma' = \frac{AC^2 + CB'^2 - AB'^2}{2 \cdot AC \cdot CB'}. \quad (6)$$

Движение робота

Приближенно прямолинейное движение центра масс робота достигается за счет последовательной работы приводов. В табл. 1 условно обозначены работающие приводы, обеспечивающие движение: номер фиксированной платформы – I; номер фиксированной опоры на подвижной платформе – II; изменение длины актуатора от предыдущего положения – III, в условных единицах.

Таблица 1

Действия приводов для обеспечения в среднем прямолинейного движения центров масс робота

№ шага	Действия приводов и актуатора											
	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3			Вариант 4		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	1	1	+3	1	2	+3	1	1	+2	1	1	+4
2	1	4	+3	1	3	+3	1	4	+2	1	4	+4
3	2	2	-3	2	2	-3	2	2	-2	2	2	-4
4	2	3	-3	2	3	-3	2	3	-2	2	3	-4
5	1	4	+3	1	3	+3	1	4	+2	1	4	+4
6	1	1	+3	1	2	+3	1	1	+2	1	1	+4
7	2	3	-3	2	3	-3	2	3	-2	2	3	-4
8	2	2	-3	2	2	-3	2	2	-2	2	2	-4

Примечание: $+k$ – удлинение; $-k$ – укорочение на k единиц.

Анализ результатов

Количественный анализ курсовых колебаний, возникающих при поступательном движении двухсекционного робота, для различных вариантов движения представлен в табл. 2. Приведены среднеквадратичные отклонения в условных единицах продольных ΔX_{ci} , поперечных ΔY_{ci} и угловых $\Delta \varphi_{ci}$ перемещений за

160 циклов работы актуатора для робота с параметрами $a = 30$; $b = 40$; начальной длиной отрезка $AB = 50$ (размеры указаны в условных единицах).

На графиках (рис. 3–8) представлены изменения продольных, поперечных и угловых координат при движении двухсекционного робота в зависимости от номера шага.

Среднеквадратичные отклонения

№ платформы	Действия приводов и актуатора											
	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3			Вариант 4		
	ΔX_{ci}	ΔY_{ci}	$\Delta \varphi_{ci}$	ΔX_{ci}	ΔY_{ci}	$\Delta \varphi_{ci}$	ΔX_{ci}	ΔY_{ci}	$\Delta \varphi_{ci}$	ΔX_{ci}	ΔY_{ci}	$\Delta \varphi_{ci}$
1	0,10	2,22	8,52	0,10	2,22	8,51	0,05	1,48	5,67	0,16	2,96	11,38
2	0,06	2,24	8,62	0,03	2,25	8,63	0,03	1,50	5,74	0,11	2,99	11,51

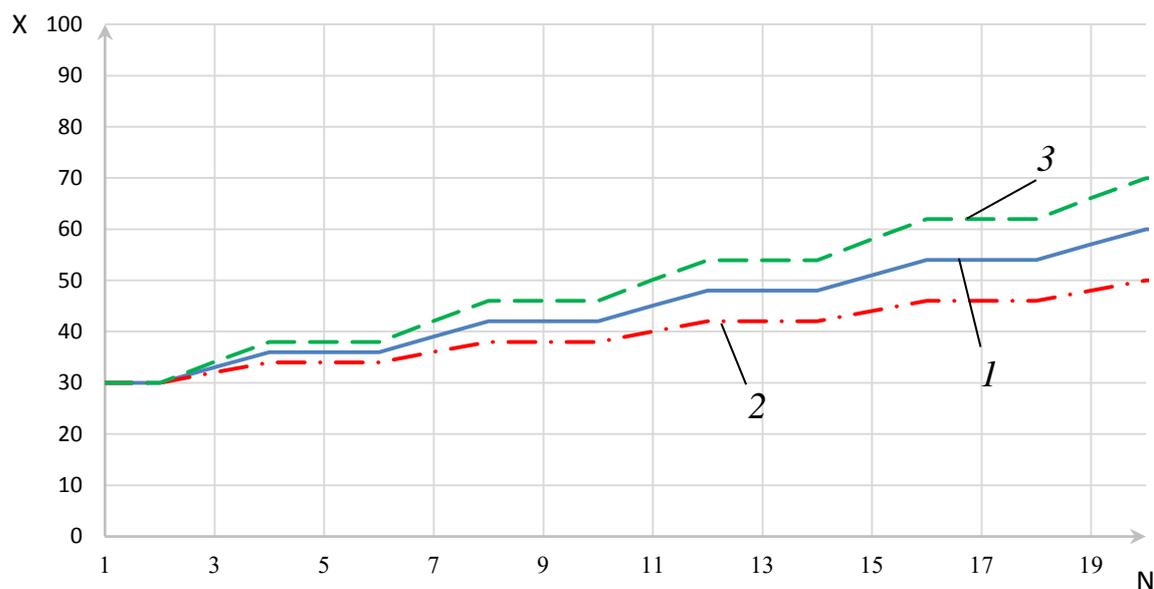


Рис. 3. Изменение продольной координаты центра масс первой платформы различных вариантов:
1 – вариант 1; 2 – вариант 3; 3 – вариант 4

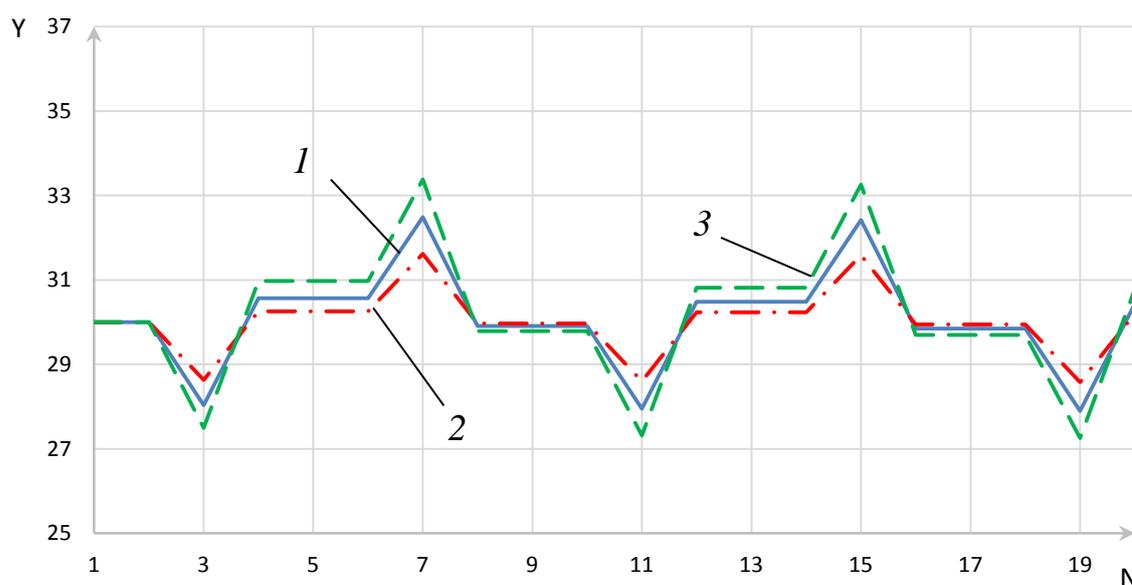


Рис. 4. Изменение поперечной координаты центра масс первой платформы различных вариантов:
1 – вариант 1; 2 – вариант 3; 3 – вариант 4

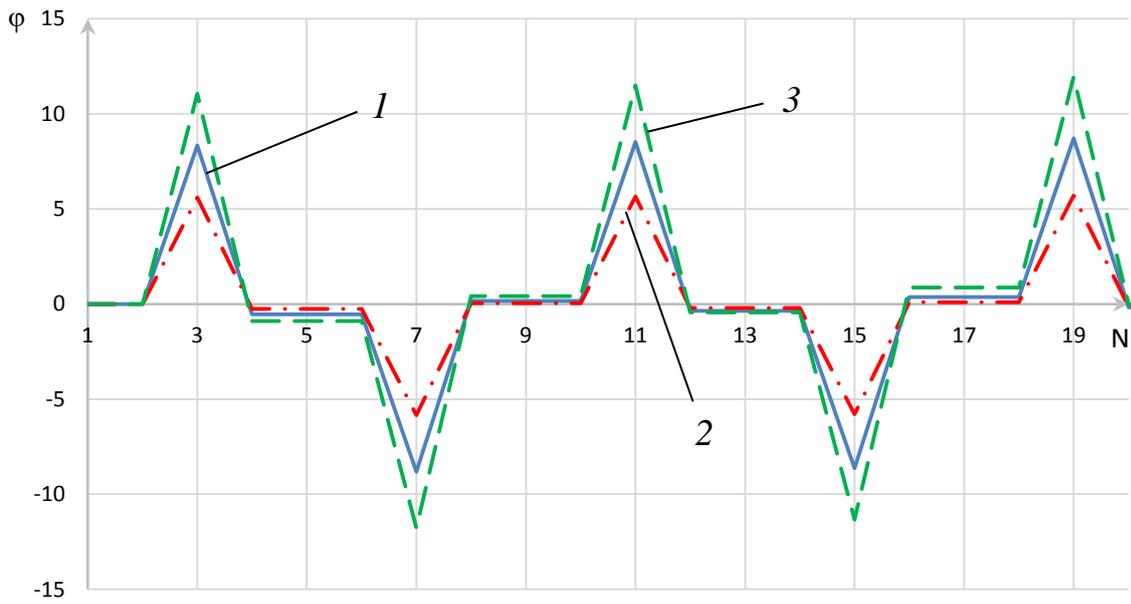


Рис. 5. Изменение угловой координаты центра масс первой платформы различных вариантов:
1 – вариант 1; 2 – вариант 3; 3 – вариант 4

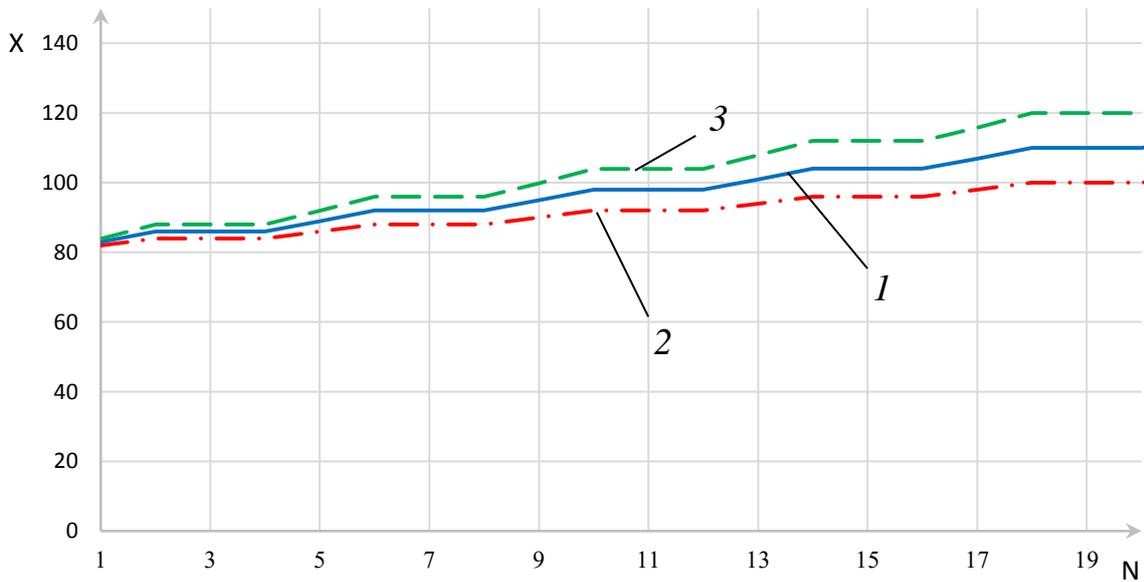


Рис. 6. Изменение продольной координаты центра масс второй платформы различных вариантов:
1 – вариант 1; 2 – вариант 3; 3 – вариант 4

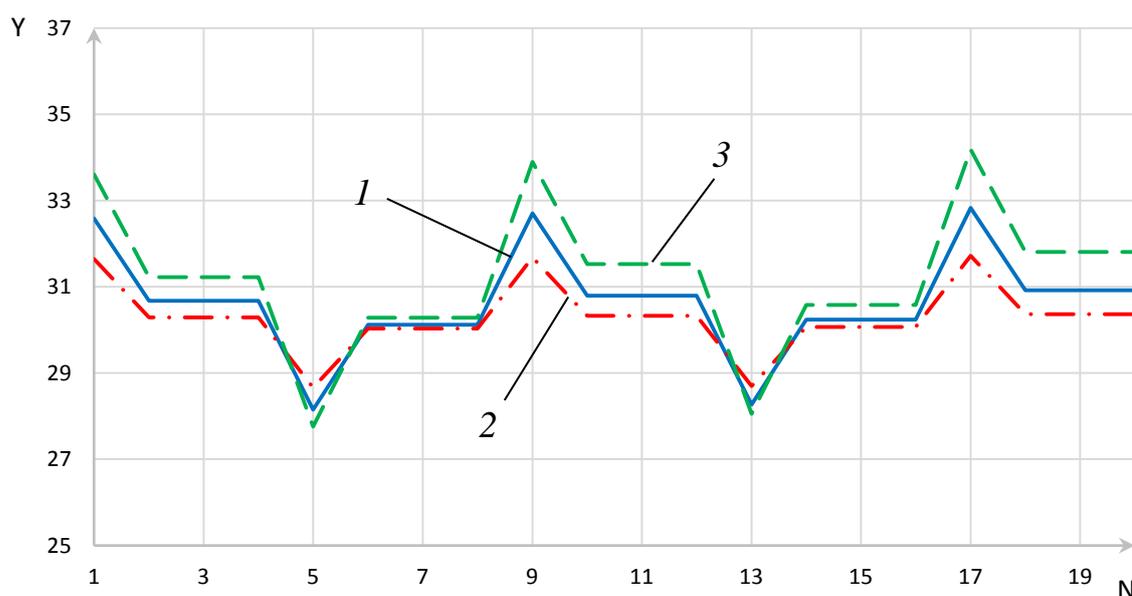


Рис. 7. Изменение поперечной координаты центра масс второй платформы различных вариантов:
1 – вариант 1; 2 – вариант 3; 3 – вариант 4

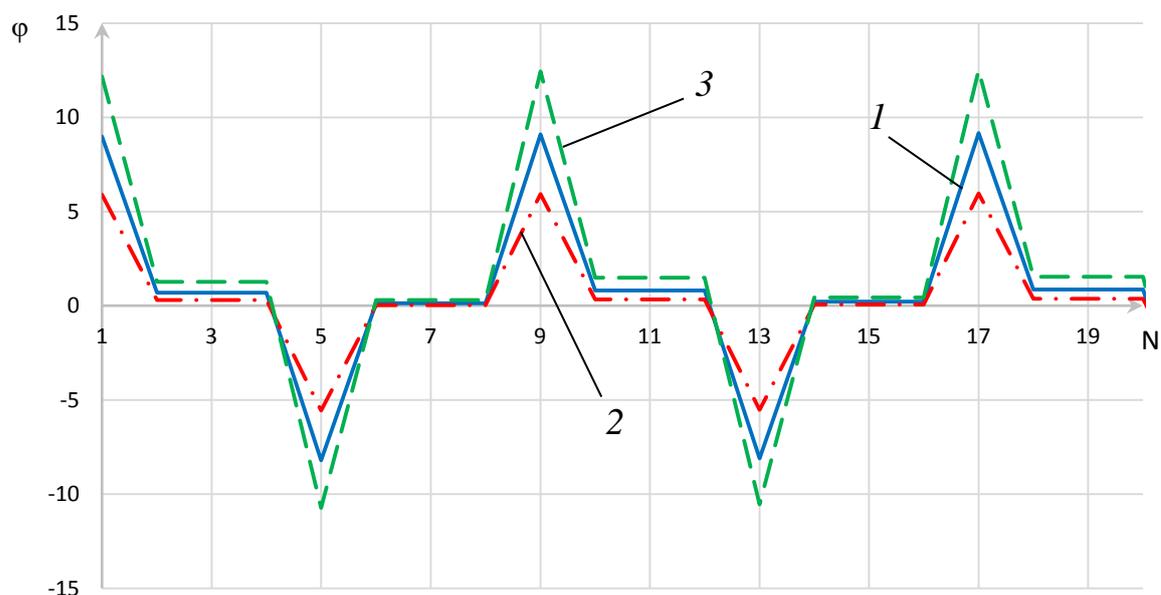


Рис. 8. Изменение угловой координаты центра масс второй платформы различных вариантов:
1 – вариант 1; 2 – вариант 3; 3 – вариант 4

Разница значений координат для вариантов 1 и 2 мала, поэтому вариант 2 не представлен на графиках изменения координат платформ двухсекционного робота из-за совпадения с вариантом 1.

Выводы

Рассмотренный метод организации движения двухсекционного робота обеспечивает, в среднем, реализацию программного движе-

ния. С увеличением хода актуатора на каждом шаге увеличиваются отклонения от программного режима, однако уменьшается средняя скорость движения.

Полученные результаты позволяют ставить задачу о выборе оптимального режима движения, состоящего в компромиссе между скоростью, энергоэффективностью и точностью осуществления программного режима движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юревич, Е. И. Основы робототехники / Е. И. Юревич. – СПб., 2005. – 416 с.
2. Павловский, В. Е. Исследование динамики и синтез управления колесными аппаратами с избыточной подвижностью / В. Е. Павловский, Д. В. Шишканов // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2006. – № 12. – С. 1–28.
3. Охоцимский, Д. Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д. Е. Охоцимский, Ю. Ф. Голубев. – М.: Наука, 1984. – 310 с.
4. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 1. Концепция проектирования / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 5. – С. 22–27.

5. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 2. Динамика движения шагающих машин серии «Восьминог» / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 19–26.

6. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 3. Алгоритмы управления движением шагающих машин серии «Восьминог» и экспериментальные исследования / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 7. – С. 13–18.

7. Бордюгов, Д. В. Об управлении движением мобильного робота с движителями, работающими на эффекте периодического закливания / Д. В. Бордюгов, Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ: научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 23–28.

УДК 004.5

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-81-83

*С. Ф. Сергеев***ПРОБЛЕМА ДВОЙНОЙ КОНТИНГЕНТНОСТИ
В КОММУНИКАЦИИ ЧЕЛОВЕКА И РОБОТА**

Санкт-Петербургский государственный университет

s.f.sergeev@spbu.ru

Рассматривается проблема двойной контингентности в коммуникации между людьми и роботами. Термин «двойная контингентность» относится к проблемам, связанным с необходимостью обеих сторон иметь общее понимание смыслов и адаптироваться к интерпретациям и реакциям друг друга. Роботы могут испытывать трудности с пониманием нюансов человеческой коммуникации и общего смысла.

Ключевые слова: двойная контингентность, робот, человеко-машинное взаимодействие, коммуникация, искусственный интеллект.

*S. F. Sergeev***THE PROBLEM OF DOUBLE CONTINGENCE
IN HUMAN AND ROBOT COMMUNICATION**

St. Petersburg State University

This article explores the problem of double contingency in communication between humans and robots. The term „double contingency“ refers to challenges associated with the need for both parties to have a shared understanding of meanings and to adapt to each other's interpretations and reactions. Robots may encounter difficulties in understanding the nuances of human communication and shared meaning.

Keywords: double contingency, robot, human-robot interaction, communication, artificial intelligence.

Развитие технологий генеративного искусственного интеллекта ведет к усложнению процессов взаимодействия человека с автономными робототехническими системами, вступающими с оператором в диалоговые формы коммуникации, решающие задачи управления, передачи и интерпретации информации. Языковые формы, генерируемые в диалоговых системах, отличаются разнообразием и неоднозначностью, что ведет к проблемам понимания со стороны оператора поступающих от робота сообщений, искажающих ответные реакции человека-оператора. Аналогично возникает проблема адекватного распознавания и выделения

из текста команд пользователя робототехнической системой. Растет проблема взаимных ошибочных интерпретаций и соответствующих нештатных ситуаций. В контексте коммуникации между человеком и роботом возникает *проблема двойной контингентности*, когда субъект (человек) и техносубъект (робот) имеют разные ожидания и интерпретации сообщений, что приводит к непониманию и недостаточной эффективности коммуникации. Данный термин был сформулирован в работах Роберта Сирса и стал широко известен благодаря трудам американского социолога Талкотта Парсонса, использовавшего его применительно к социальным

системам [1], и немецкого социолога Никласа Лумана [2], создавшего модель коммуникативного действия. По мнению Парсонса, коммуникационному взаимодействию присуща двойная зависимость от обстоятельств, в которых действует каждый коммуникатор. С одной стороны, оно зависит от выбираемых альтернатив, а с другой – от реакции каждого участника коммуникации. Эти обстоятельства, отражающие вероятностный и случайный характер смысловой связи человеческих действий, отражены в феномене *двойной контингенции*. Термин контингенция происходит от латинского слова *contingere* – касаться, граничить, случаться, происходит по неизвестным причинам и факторам – и объединяет в понятийном строе случайное и возможное.

В человеческой коммуникации двойная контингентность означает, что успешная коммуникация зависит от наличия общего понимания символов, знаков и значений обеими сторонами. Включает в себя два уровня контингентности: первый относится к тому факту, что индивиды интерпретируют и реагируют на действия и выражения других на основе субъективного понимания ситуации. Иными словами, интерпретация коммуникации каждого человека зависит от его собственного видения перспективы развития ситуации. Второй уровень контингентности включает в себя необходимость для обеих сторон признавать и адаптироваться к интерпретациям и реакциям друг друга. Другими словами, индивиды должны быть осведомлены о том, что их действия зависят от ожидаемых реакций другой стороны, и наоборот. Это взаимное признание и коррекция критически важны для эффективной коммуникации.

Когда речь идет о коммуникации между человеком и роботом, проблема двойной контингентности становится особенно актуальной. Роботы и системы искусственного интеллекта не обладают тем же уровнем понимания, интерпретации и адаптации, что и люди. Они не способны взаимодействовать с такой же нюансированной, зависящей от контекста и социально встроенной коммуникацией, как это делают люди. В результате возникает ряд проблем:

ограниченное понимание – роботы могут испытывать трудности с пониманием тонких намеков, невербальной коммуникации и контекстуальных нюансов, которые являются важными для человеческой коммуникации;

отсутствие адаптируемости – роботы обычно следуют заранее заданным алгоритмам и реак-

циям, которые могут быть жесткими, и не способны адаптироваться к динамичной и контингентной природе человеческой коммуникации;

отсутствие общего смысла – в отличие от людей, роботы не обладают глубоким пониманием культурных, социальных и эмоциональных контекстов, которые критически важны для общего смысла в коммуникации.

Одной из причин появления этой проблемы в человеко-машинном взаимодействии и робототехнике является различие в способах восприятия и обработки информации между человеком и роботом. Человек основывает свое понимание на широком контексте, опыте и эмоциональных нюансах, в то время как роботы, основанные на принципах искусственного интеллекта, могут оперировать только данными, предоставленными им в рамках их программного кода или обучающих выборок [3].

Другая причина связана с несовершенством технологий, которые используются в настоящее время для общения с роботами. Распознавание и синтез речи, анализ жестов и мимики, а также обработка естественного языка все еще являются сложными задачами для автономных роботов. Это может приводить к неправильному распознаванию и интерпретации сообщений со стороны робота, что, в свою очередь, затрудняет понимание команд и запросов с его стороны.

Кроме того, взаимодействие между людьми и роботами может быть затруднено различиями в культурных и социальных конвенциях разработчиков и пользователей. В роботах не всегда можно адекватно учесть культурные нормы, табу и нюансы коммуникации, что может привести к нежелательным социально обусловленным, неправильным реакциям со стороны человека. В заключение отметим проблему этического использования генеративного искусственного интеллекта (ГИИ)-технологий в коммуникации «человек – робот». Например, если система ГИИ становится слишком «умной» и имитирует человеческое поведение, может возникнуть риск обмана или создания иллюзии настоящего субъекта, что может привести к неправильным представлениям и ошибочным ожиданиям у людей.

Для преодоления проблемы двойной контингенции в коммуникации между человеком и роботом необходимы улучшение технологий и дальнейшее развитие искусственного интеллекта. Роботы должны стать более гибкими и адаптивными, способными адекватно реагировать на контекст и эмоциональные сигналы человека. Также важно учесть культурные и со-

циальные различия в среде коммуникации; внедрить системы, которые позволяют роботам учитывать контекст коммуникации и принимать во внимание индивидуальные особенности конкретного пользователя.

Обучение роботов эмоциональной и социальной интеллектуальной составляющей, а также усовершенствование их способности адаптации к контексту и интерпретации нюансов языка являются ключевыми аспектами для решения проблемы двойной контингенции. Решение проблемы может включать в себя разработку более точных алгоритмов распознавания и синтеза речи, обработки естественного языка и анализа мимики, жестов и других невербальных сигналов. Все это отражается в мультимедийных интерфейсах [4, 5].

Важно проводить обучение пользователей, чтобы они могли лучше понимать возможности и ограничения роботов, а также предоставлять им ясные инструкции и коммуникационные сигналы. Необходимо обучение людей использованию определенных жестов, мимики или специального языка с ограниченным алфавитом, который робот может легче интерпретировать, а пользователь не перегружает им свою память.

Разработчики роботов и исследователи проблем человеко-машинной коммуникации должны активно сотрудничать с психологами, социологами и другими специалистами в области человеческого поведения и коммуникации, чтобы лучше понять социальные и культурные аспекты взаимодействия между людьми и роботами.

В целом проблема двойной контингенции в коммуникации между человеком и роботом является сложной и многогранной проблемой, требующей комплексного подхода. Развитие технологий и более глубокое понимание человеческого поведения и коммуникации помогут сделать коммуникацию с роботами более эффективной и понятной.

Отметим перспективы и ограничения двойной контингенции в коммуникации «человек – робот» с помощью технологий генеративного искусственного интеллекта:

– использование современных методов генерации естественного языка для создания более связных, согласованных и естественных ответов на сообщения пользователей;

– учет контекста сообщений и действий, чтобы лучше понимать, что имел в виду чело-

век и как наиболее эффективно отвечать на его запросы;

– развитие ГИИ-технологий, способных распознавать и адекватно реагировать на эмоции людей;

– использование обратной связи от пользователей для улучшения роботом способностей коммуникации.

Вместе с тем отметим, что генеративные языковые модели не формируют вопросы в процессе диалога с человеком. Они стараются как можно более точно предсказать ожидания пользователя, содержащиеся в вопросе, и предложить соответствующий им ответ-текст. Это создает особую в виде допроса, форму коммуникации, в которой человек является активной стороной, пытающейся поддерживать коммуникацию. Такого рода асимметричная коммуникация представляет собой угрозу при работе в условиях неопределенности в которых пользователь может потерять возможность задавать роботу адекватные ситуации вопросы и ориентацию в текущей ситуации.

Решение проблемы двойной контингентности во взаимодействии между человеком и роботом позволит осуществлять не только командное управление с инициативой человека-оператора, но и взаимно-ориентирующее, способствующее передаче опыта робота человеку и обратно, коммуникационное взаимодействие. Однако данная проблема требует дополнительного исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Парсонс, Т.* К общей теории действия. Теоретические основания социальных наук / Т. Парсонс // Парсонс Т. О структуре социального действия : пер. с англ. / Т. Парсонс ; под общ. ред. В. Ф. Чесноковой, С. А. Белановского. – М. : Академический проект, 2002. – С. 436–437.
2. *Луман, Н.* Социальные системы. Очерк общей теории / Н. Луман. – СПб.: Наука, 2007.
3. *Сергеев, С. Ф.* Двойная контингенция в человеко-машинном взаимодействии // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики / С. Ф. Сергеев. – 2018. – № 2 (87). – С. 9–12.
4. *Сергеев, С. Ф.* Методологический базис проектирования симбиотических сред тренажеров мехатронных и робототехнических систем / С. Ф. Сергеев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18. – № 12. – С. 824–828. DOI: 10.17587/mau.18.824-828.
5. *Спасский, Б. А.* Обзор современных интерфейсных систем операторов мобильных наземных роботов / Б. А. Спасский // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 4 (13). – С. 21–31.

УДК 007.52+621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-84-87

*А. А. Хачатрян, Л. Д. Смирная***ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ РОБОТА,
ОПИРАЮЩЕГОСЯ НА РАЗЛИЧНО ОРИЕНТИРОВАННЫЕ
РОВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ*****Волгоградский государственный технический университет**

Agram-081097@mail.ru

Предложены расчетная схема и математическая модель робототехнической системы, использующей линейный привод для перемещения по вертикальной ровной поверхности. Решена задача динамики движения мобильного робота, перемещение которого по рабочей поверхности осуществляется за счет управления величиной и направлением усилия, развиваемого актуатором. Получены уравнения и траектория движения центра масс мобильного робота.

Ключевые слова: мобильные робототехнические средства, перемещение, математическая модель, задача динамики, движение по вертикальной поверхности.

*A. A. Khachatryan, L. D. Smirnaya***FEATURES OF THE DYNAMICS OF THE CONTROLLED MOVEMENT OF
THE ROBOT, BASED ON VARIOUS ORIENTED FLAT SURFACES****Volgograd State Technical University**

The design scheme and mathematical model of a robotic system using a linear actuator to move along a vertical flat surface are presented in this article. The task of motion dynamics of a mobile robot is solved, the movement of which on the working surface is carried out by controlling the magnitude and direction of the force developed by the actuator. The equations of motion and the trajectory of the center of mass of the mobile robot are obtained.

Keywords: mobile robotics, displacement, mathematical model, the task of dynamics, movement on a vertical surface.

Введение

Учитывая особые условия осуществления тех или иных технологических операций на высоте, эксплуатация роботов, способных перемещаться по вертикальным и наклонным поверхностям, имеет широкие перспективы. Области применения этих машин могут быть различными [1]. Такие роботы могут в том числе повысить безопасность и эффективность выполнения работ на высоте, а также снизить риски для человеческой жизни.

Существуют различные виды роботов, способных перемещаться по наклонным и вертикальным поверхностям за счет вакуумных устройств, электромагнитного взаимодействия, тросовых движителей или адгезии. Основными ограничениями применения указанных движителей являются требования к поверхности, по которой необходимо перемещаться, и к ее ориентации [2–5]. В работе рассматривается движение робота, опирающегося на вертикальную поверхность за счет прижатия к ней «толкающим» движителем, установленным на горизон-

тальной поверхности. За счет работы одного линейного привода и осуществляется реализация усилия «прижатия» робота к вертикальной поверхности [6–7].

Постановка задачи

Ставится задача определения перемещения (получения уравнений движения) центра масс мобильного робота и его ориентации при известном выдвигании штока линейного привода механизма прижатия и усилия, развиваемого им для обеспечения требуемого перемещения. Задача дополняется построением траектории движения мобильного робота.

**Расчетная схема робототехнической системы
с одной опорой
на горизонтальную поверхность**

Расчетная схема рассматриваемой робототехнической системы с одним линейным приводом приведена на рис. 1, а. Рассматривается движение робототехнической системы, состоящей из робота 1, представленного на рисунке характерной поверхностью S , перемещающего-

© Хачатрян А. А., Смирная Л. Д., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

ся по вертикальной (рабочей) поверхности 2, опираясь на нее тремя опорами 3–5. Требуемое перемещение робота реализуется за счет усилия P , приложенного со стороны линейного привода механизма прижатия 6, закрепленного на горизонтальной (опорной) поверхности

сти 7. Изучается вращательное движение мобильного робота вокруг заторможенных поочередно опор 3 и 4 при расторможенных остальных опорах и воздействии усилием P со стороны механизма прижатия на мобильного робота.

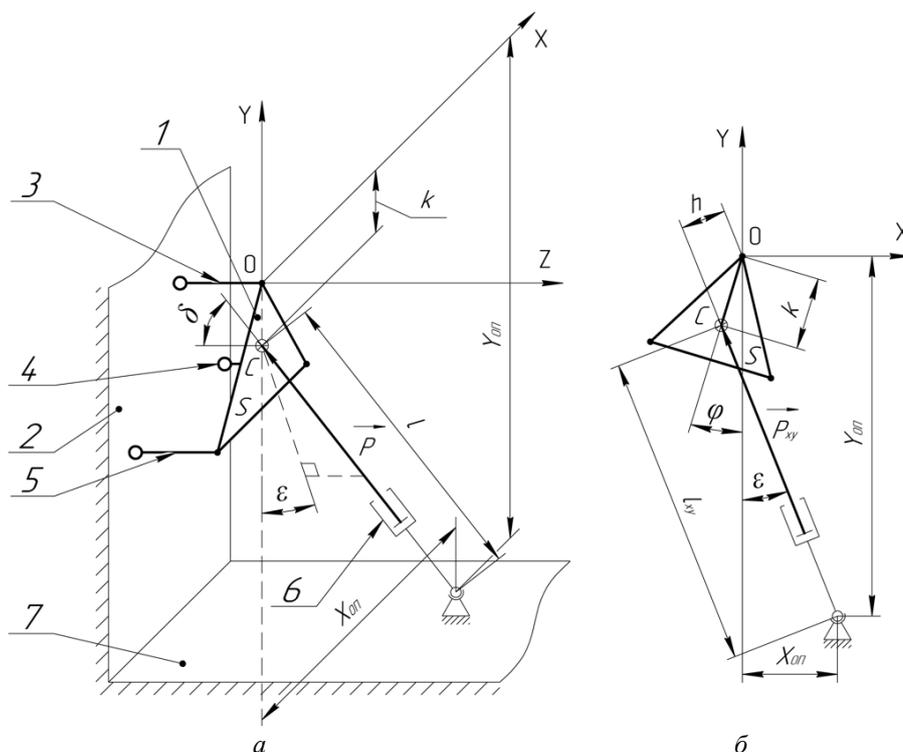


Рис. 1. Расчетная схема робота с механизмом прижатия:
 а – общий вид робототехнической системы; б – проекция робототехнической системы на плоскость XOY

При описании расчетной схемы использованы следующие обозначения: C – центр масс робота; k – расстояние от заторможенной опоры 3 или 4 (оси вращения) до центра масс робота; $x_{оп}$, $y_{оп}$ – соответственно координаты основания механизма прижатия робота в плоскости XOY ; δ – угол между усилием P и отрицательным направлением оси Z ; ϵ – угол между проекцией усилия P на плоскость XOY и осью Y ; φ – угол поворота мобильного робота вокруг заторможенной опоры; l , l_{xy} – длина линейного привода механизма прижатия и его проекция на плоскость XOY соответственно; P_{xy} – проекция усилия P на плоскость XOY ; h – расстояние от оси вращения до линии действия силы P в плоскости XOY .

Метод решения

При решении поставленной задачи принимается, что усилие прижатия P обеспечивает вращательное движение робота вокруг неподвижной опоры, при этом силами трения между

расторможенными опорами и рабочей поверхностью пренебрегается. Рассматривается процесс движения, состоящий из трех этапов. На первом и третьем этапах вращение происходит относительно неподвижной опоры 3, на втором – относительно неподвижной опоры 5. Таким образом, требуемая траектория движения робота достигается поочередным торможением его опор, при воздействии усилия P механизма прижатия.

Приведены зависимости для первого этапа движения: вращение вокруг заторможенной опоры 3, совпадающей с осью Z . Уравнение вращательного движения в дифференциальной форме представляется в виде

$$I_z \ddot{\varphi} = M_z, \tag{1}$$

где I_z – момент инерции мобильного робота относительно оси Z , проходящей через опору 3; M_z – главный момент внешних сил, действующих на мобильного робота относительно оси Z :

$$M_z = P_{xy} h - F_{\text{тяж}} k \sin \varphi. \tag{2}$$

Для осуществления поставленной цели задается закон движения мобильного робота по вертикальной поверхности (зависимостью изменения угла поворота робота вокруг заторможенной опоры от времени в плоскости XOY):

$$\varphi = at^3 + bt^2 + ct + d, \quad (3)$$

где a, b, c, d – неизвестные, определяемые при заданных граничных условиях.

Тогда координаты центра масс робота x_c и y_c в момент времени t можно вычислить с помощью системы

$$\begin{cases} x_c = -k \sin \varphi; \\ y_c = -k \cos \varphi. \end{cases} \quad (4)$$

Зависимость длины линейного привода от координат центра масс робота можно задать следующим выражением:

$$l = \frac{\sqrt{(x_c - x_{\text{оп}})^2 + (y_c - y_{\text{оп}})^2}}{\sin \delta}. \quad (5)$$

Полученные зависимости позволяют решить дифференциальное уравнение (1) и построить траекторию движения мобильного робота.

Имитационное моделирование

Для решения уравнения (1), определения величины усилия линейного привода, обеспечивающего требуемое перемещение, и построения траектории движения мобильного робота задаются необходимые массово-геометрические параметры робототехнической системы, начальные и граничные условия при движении робота по рабочей поверхности (см. таблицу). При этом время τ для каждого из этапов принимается равным трем секундам.

Исходные данные для имитационного моделирования

Массово-геометрические параметры				Начальные условия при $t = 0$ с	Граничные условия при $t = \tau = 3$ с
$I_c = 3,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$k = 0,5 \text{ м}$	$x_{\text{оп}} = 0,5 \text{ м}$	$x_0 = 0 \text{ м}$	$\varphi_0 = 0 \text{ рад}$	$\varphi_\tau = \frac{\pi}{2}$
$m = 5 \text{ кг}$	$\delta = 60^\circ$	$y_{\text{оп}} = -3 \text{ м}$	$y_0 = 0 \text{ м}$	$\dot{\varphi}_0 = 0 \text{ с}^{-1}$	$\dot{\varphi}_\tau = 0 \text{ с}^{-1}$

Для указанных начальных и граничных условий получена зависимость угла поворота мобильного робота вокруг заторможенной опоры φ от времени для первого этапа:

$$\varphi = -\frac{\pi}{\tau^3} t^3 + \frac{3\pi}{2\tau^2} t^2. \quad (6)$$

Для определения перемещения мобильного робота по рабочей поверхности получены графики зависимости координат его центра масс x_c и y_c от длины l линейного привода механизма прижатия (рис. 2). Построена траектория движения робота в плоскости XOY (рис. 3).

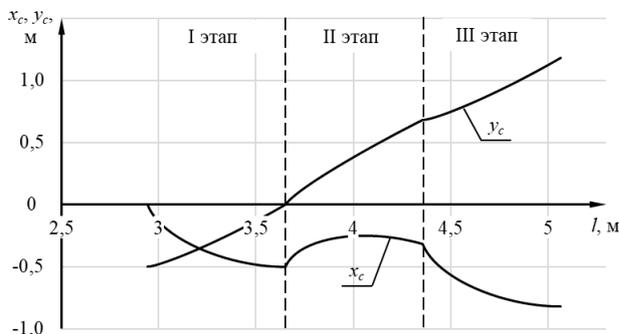


Рис. 2. График зависимостей координат центра масс мобильного робота от длины штока линейного привода механизма прижатия

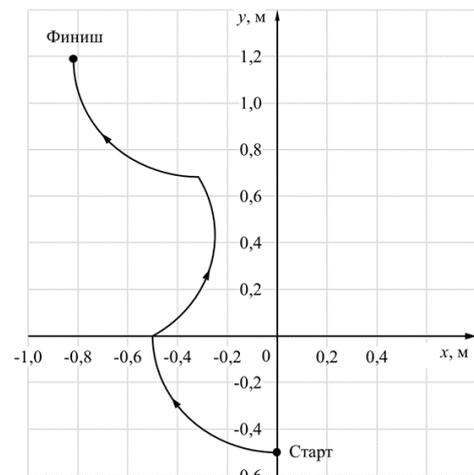


Рис. 3. Траектория движения центра масс робота

Для обеспечения требуемого перемещения мобильного робота вычислены значения усилия, возникающего на штоке линейного приво-

да механизма прижатия, и получен график зависимости указанного усилия от длины линейного привода, представленный на рис. 4.

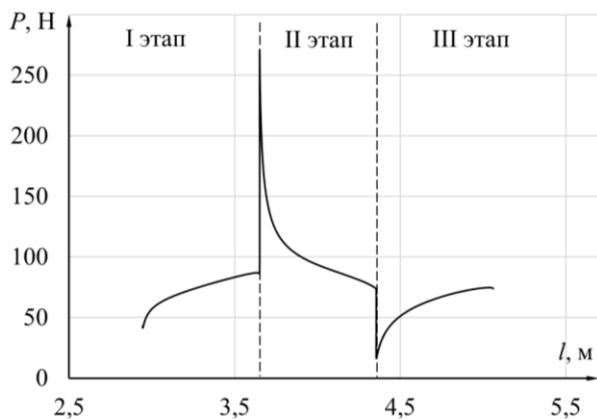


Рис. 4. График зависимости усилия, возникающего на штоке линейного привода механизма прижатия, от его удлинения при $x_{оп} = 0,5$ м; $y_{оп} = -3$ м

Выполненные расчеты позволяют определить диапазон изменения длины штока линейного привода механизма прижатия l от 2,9 до 5,1 м. При этом усилие P принимает значения от 20 до 270 Н. Одним из способов уменьшения значения данного усилия является определение оптимального расположения основания механизма прижатия робота. Так, уменьшение абсолютных значений его координат $x_{оп}$, $y_{оп}$ до 0,1 м и $-2,6$ м соответственно приводит к уменьшению требуемого усилия P до значений от 15 до 185 Н. При этом диапазон изменения длины штока линейного привода механизма прижатия l составляет от 2,4 до 4,5 м (рис. 5).

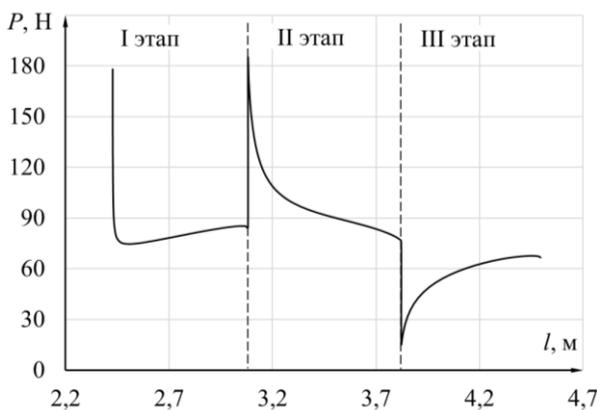


Рис. 5. График зависимости усилия, возникающего на штоке линейного привода механизма прижатия, от его удлинения при $x_{оп} = 0,1$ м; $y_{оп} = -2,6$ м

Скачки значений усилия на границах этапов движения объясняются граничными условиями: при переходе между этапами мобильный робот

совершает остановку, перед тем как сменить заторможенное колесо, после чего возобновляет движение.

Выводы

Решена задача определения перемещения центра масс мобильного робота по вертикальной поверхности:

- получены уравнения и траектория движения центра масс робота;
- определены координаты расположения опоры механизма прижатия, обеспечивающие минимальные значения усилия актуатора;
- вычислено усилие прижатия, развиваемое актуатором, необходимое для обеспечения требуемого перемещения.

Полученные результаты позволяют подобрать привод, необходимый для организации движения робота, и поставить задачу определения оптимальных режимов этого движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Silva, Manuel & Tenreiro Machado, José. A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion. 10.5772/8826. – 2010.
2. 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.
3. Хачатрян, А. А. Мобильные робототехнические системы, перемещающиеся по 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.
4. Сырых, Н. В. Роботы вертикального перемещения с контактными устройствами на основе постоянных магнитов: конструкции и принципы управления контактными устройствами / Н. В. Сырых, В. Г. Чашухин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 5. – С. 163–173.
5. Daltorio, K. Mini-Whlegs TM Climbs Steep Surfaces Using Insect-inspired Attachment Mechanisms / Daltorio, Kathryn and Wei, Terence and Horchler, Andrew and Southard, Lori and Wile, Gregory and Quinn, Roger and Gorb, Stanislav and Ritzmann, Roy // I. J. Robotic Res.– Vol. 28 – 2009. – Pp. 285–302.
6. Хачатрян, А. А. О перемещении трехопорного мобильного робота по произвольно ориентированной поверхности / А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 89–95.
7. Хачатрян, А. А. О перемещении мобильного робота по произвольно ориентированным поверхностям / А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 86–93.

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2024-4-287-88-94

Н. Г. Шаронов¹, В. Е. Пряничников², Н. В. Коломин¹, М. Ю. Ветлицын¹
**МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
С КИНЕМАТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМИ
ЦИКЛОВЫМИ ШАГАЮЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ***

¹ Волгоградский государственный технический университет² Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

dpm@vstu.com

Обсуждаются методы управления побортно кинематически связанными цикловыми шагающими движителями наземного мобильного робота. Приведено сравнение различных алгоритмов движения по относительно ровной поверхности. Рассмотрены варианты систем удаленного и дистанционного управления с частотным регулированием электропривода шагающих движителей.

Ключевые слова: цикловой механизм шагания, мобильный робот, электропривод.

N. G. Sharonov¹, V. E. Pryanichnikov², N. V. Kolomin¹, M. Y. Vetlitsyn¹

**MOTOR CONTROL METHODS FOR A MOBILE ROBOT WITH KINEMATICALLY
CONNECTED CYCLIC WALKING PROPULSORS**

¹ Volgograd State Technical University² Keldysh Institute of Applied Mathematics

Drive control methods of a walking mobile robot with cyclic propulsors, along the sides of the body and kinematically connected, are discussed. A comparison of different motion algorithms on a relatively flat surface is given. Variants of remote and remote control systems with frequency control of the electric drive of walking propellers are considered.

Keywords: cyclic walking mechanism, mobile robot, electric drive.

Применение механизмов шагания в качестве движителей часто приводит к использованию избыточного количества двигателей и, как следствие, возможности реализации сложных программных движений [1]. В то же время некоторые типы механизмов шагания могут быть использованы в составе кинематически связанного привода с меньшим количеством двигателей. С этой точки зрения привод мобильных роботов можно разделить на индивидуальный для каждого из звеньев механизма шагания, индивидуальный для каждого из механизмов шагания [2], индивидуальный для каждого из движителей или связанных побортно движителей [3]. Каждый из перечисленных вариантов компоновки корпус-привод-двигатель мобильной робототехнической системы характеризуется различными кинематическими схемами.

Исследования кинематики и динамики шагающих движителей [3, 4] позволяют современным исследователям мобильных роботов сосредоточиться на проблемах управления двигателями мобильного робота. В работе проводится анализ системы управления мобильного

робота с побортно расположенными цикловыми движителями как робототехнической системы корпус-привод-двигатели.

Особенности цикловых движителей различных конструкций широко изучены как отдельно, так и в составе мобильных роботов. Всестороннее изучение теории и проведенные экспериментальные исследования шагающих машин с цикловыми движителями подтвердили возможность практического использования цикловых механизмов. Современные исследования мобильных роботов цикловыми шагающими движителями направлены прежде всего на поиск управления и очувствления подобными роботами, в том числе на формирование критериев, обеспечивающих эффективное или оптимальное движение мобильных роботов, в частности, в сложных условиях.

Кинематические схемы накладывают на формирование программных движений при планировании движения корпуса дополнительные ограничения. Эти ограничения связаны прежде всего с расположением движителей относительно корпуса (например, отсутствие

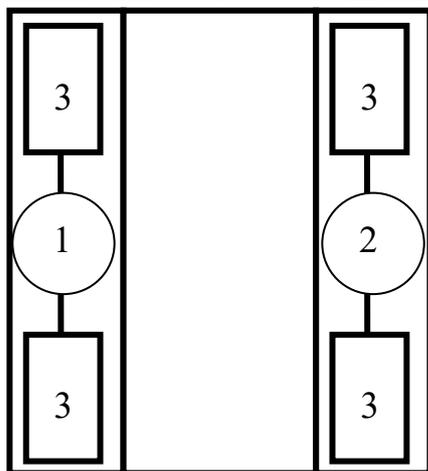
© Шаронов Н. Г., Пряничников В. Е., Коломин Н. В., Ветлицын М. Ю., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00720, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00720/>.

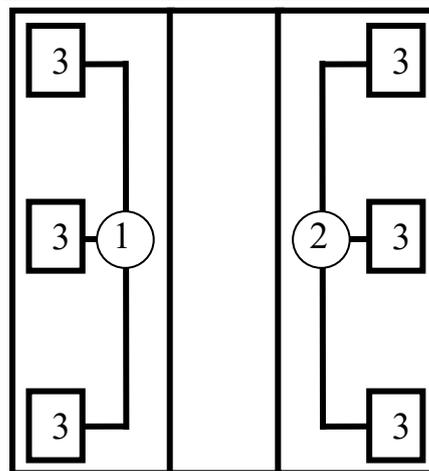
возможности поворота относительно корпуса плоскости шагания). Применение дополнительных кинематических связей уменьшает возможности маневрирования при одновременном снижении количества используемых независимых двигателей, а реализация программных движений корпуса связана с проскальзыванием движителей относительно опорной поверхности.

В работе рассматривается мобильный робот с побортно расположенными механизмами шагания, привод которых осуществляется за счет работы двух побортно расположенных электродвигателей. К подобным мобильным роботам относятся (рис. 1) «Восьминог» (побортно связаны два движителя, каждый из которых представляет собой сдвоенный механизм шагания) и «МАК-1» (побортно связаны три механизма шагания).

Для моделирования кинематики и динамики движения рассматриваемого робота с побортным расположением движителей применена экспериментально проверенная модель динамики плоского движения [3]. Положение робота на плоскости определяется координатами центра масс машины и углом поворота корпуса машины относительно центра масс. Для исследуемых цикловых движителей положения ведущих звеньев механизмов шагания (походка) может быть задана соотношением углов, характеризующих положения ведущих кривошипов. Походку можно описывать комбинацией углов ведущих звеньев шагающих движителей. При наличии кинематических связей движителей по бортам описание управляющих воздействий (походки шагающих движителей) упрощается до комбинации двух углов $\alpha_1 - \alpha_2$ ведущих валов расположенных побортно двигателей.



a



б

Рис. 1. Мобильные роботы «Восьминог» (*a*) и «МАК-1» (*б*) с побортным расположением кинематически связанных движителей; 1, 2 – двигатели побортно сгруппированных движителей; 3 – движители

Для изменения скорости относительного движения опорных точек движителей по бортам модуля, и, следовательно, скорости и направления движения машины, необходимо изменение скорости вращения приводов шагающих механизмов на каждом из бортов. Управ-

ление движением робота упрощенно можно выразить в виде зависимости угловой скорости вращения вала каждого из двигателей:

$$\begin{cases} \omega_1 = k_1 \omega, \omega_1 = \dot{\alpha}_1 \\ \omega_2 = k_2 \omega, \omega_2 = \dot{\alpha}_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где k_1, k_2 – переменные коэффициенты регулирования; ω – постоянная, характеризующая номинальную скорость вращения двигателя.

Переменные коэффициентов регулирования k_1, k_2 в (1) зависят от системы управления мобильного робота. Как при управлении непосредственно оператором (в зоне видимости или удаленно при телеуправлении), так и при автоматизированном управлении, коэффициенты k_1, k_2 задаются как переменные функции или набором

базовых движений. Под набором базовых движений понимается ограниченный набор типовых соотношений k_1, k_2 , заданных в виде непрерывных функций (при использовании регулируемого привода) или дискретно (k_1, k_2 принимают значения «1», «0», «-1»). Схематичное описание состояния мобильного робота с побортным расположением движителей приведено на рис. 2 и ниже в таблице.

Пример описания состояния мобильного робота с побортным расположением кинематически связанных движителей

«Вперед»	$k_1 = 1$	$k_2 = 1$
«Стоп»	$k_1 = 0$	$k_2 = 0$
«Назад»	$k_1 = -1$	$k_2 = -1$
«Вперед» один борт 2	$k_1 = 0$	$k_2 = 1$
«Вперед» один борт 1	$k_1 = 1$	$k_2 = 0$
«Назад» один борт 2	$k_1 = 0$	$k_2 = -1$
«Назад» один борт 1	$k_1 = -1$	$k_2 = 0$
Разворот «1-2»	$k_1 = -1$	$k_2 = 1$
Разворот «2-1»	$k_1 = 1$	$k_2 = -1$

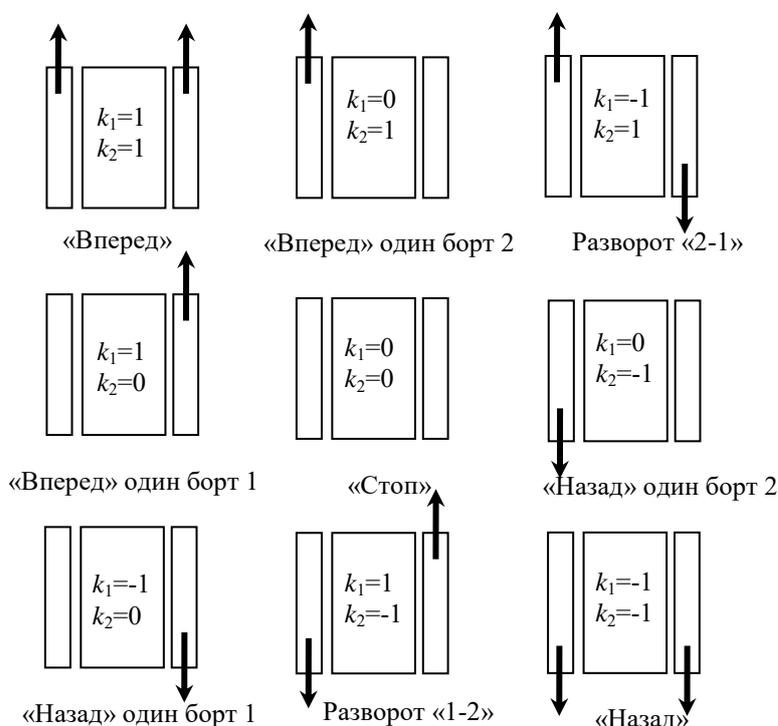


Рис. 2. Схематичное описание состояний мобильного робота с побортным расположением движителей

Контроль программного движения транспортного комплекса осуществляется по системе технического зрения [5] или оператором, опре-

деляющим отклонение между истинным и программным положением транспортного комплекса и его элементов. Например, контроли-

руемыми параметрами могут быть координаты корпуса робота, что обеспечивает соответствие движения робота программному.

Программное движение мобильного робота с побортным расположением движителей может быть определено различными способами [3, 5]. Например, используя разделение движения на плоскости по реперным точкам x'_K, y'_K (положение которых однозначно задано и считается известным), алгоритм движения от реперной точки к реперной точке может быть задан в виде условия для коэффициентов k_1, k_2 в зависимости от положения реперной точки (ориентира) x_K, y_K относительно робота. Координаты реперной точки на поверхность x'_K, y'_K и относительно робота с учетом угла поворота корпуса ψ связаны соотношением

$$\begin{cases} x'_K = x'_C + x_K \cos \psi - y_K \sin \psi \\ y'_K = y'_C + x_K \sin \psi + y_K \cos \psi \end{cases} \quad (2)$$

Угол φ между направлением на реперную точку и продольной строительной осью корпуса робота

$$\varphi = \arctan \frac{x_K}{y_K} \quad (3)$$

Условное разделение плоскости движения относительно корпуса обосновывает алгоритм управления двигателями в зависимости от отклонения φ корпуса робота от курса (по направлению на реперную точку). Возможные значения параметров k_1, k_2 приведены на рис. 3.

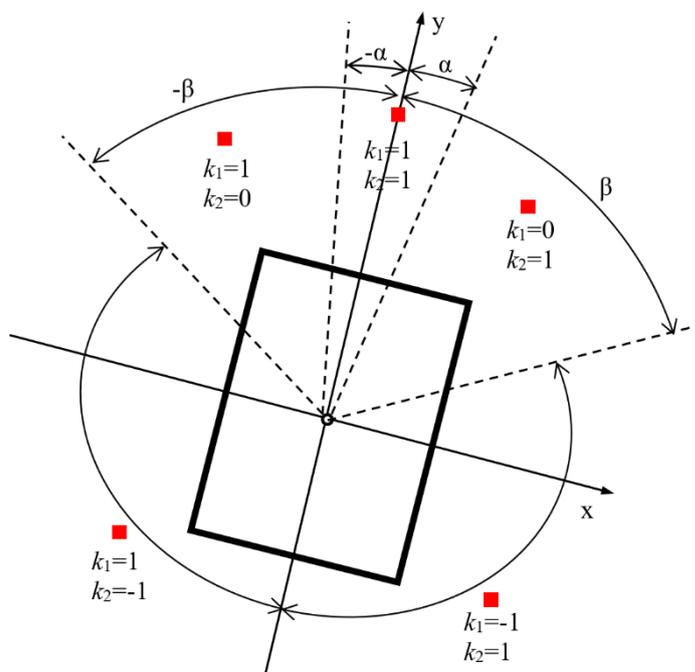


Рис. 3. Схема условного разделения плоскости движения и вариант алгоритма определения коэффициентов регулирования

В зависимости от соотношения значений углов α и β алгоритм управления может существенно меняться. Например, при $\beta=0$ курсовое движение разделяется на два этапа; в начале движения осуществляется разворот на направление к реперной точке, а далее – прямолинейное движение.

Сравнение моделирования динамики плоского движения мобильного робота со сдвоенными цикловыми механизмами шагания по некоторым алгоритмам приведено на рис. 4.

Экспериментальное исследование систем управления движением мобильного робота с побортно сгруппированными движителями

при подходе к выбранному ориентиру проведено для шагающей машины «Восьминог» и подводного мобильного робота «МАК-1». Местоположение машины относительно выбранных ориентиров определялось расчетом по данным с двух видеокамер [6] или по положению датчика [7].

Практический опыт управления движением шагающей машины в сложных условиях слабо-несущего грунта [3] или под водой [8, 9] продемонстрировал сложность непосредственного управления оператором всеми движителями как при непосредственно визуальном контроле, так и с использованием удаленного видеоконтроля.

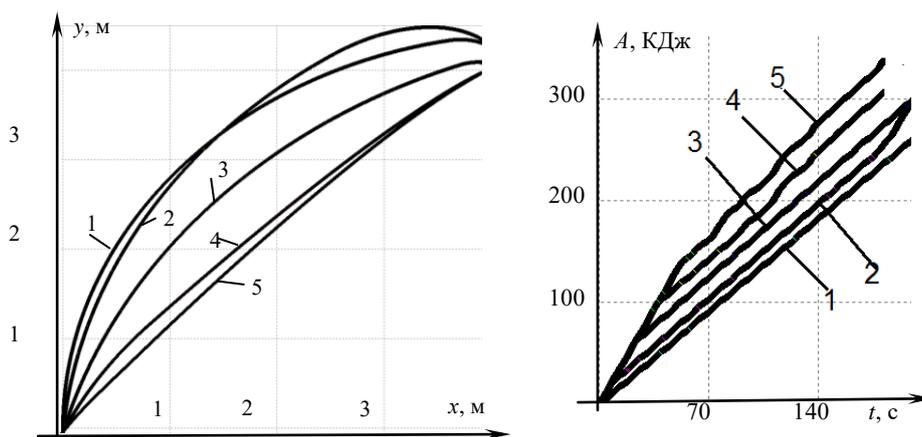


Рис. 4. Траектория движения центра масс корпуса изотраченная на перемещение машины работа при различных значения угла β ($\varphi_0=45^\circ$):
 1 – $\beta=10^\circ$; 2 – $\beta=20^\circ$; 3 – $\beta=30^\circ$; 4 – $\beta=40^\circ$; 5 – $\beta=50^\circ$

Использование частотно-регулируемого электропривода позволяет достичь более точного и гибкого управления движением мобильного робота, а также повысить его энергетическую эффективность.

Управление частотными преобразователями оператором осуществляется с помощью выносного пульта (блок управления 1, рис. 5) с кноп-

ками «Пуск/Стоп», «Реверс/Стоп» и потенциометрами R1 и R2 для регулирования частоты вращения. Данная система проста в использовании, но ограничена в возможностях настройки и управления системой без доступа к частотным преобразователям (ЧП1, ЧП2) – требуется наличие проводного подключения к частотным преобразователям.

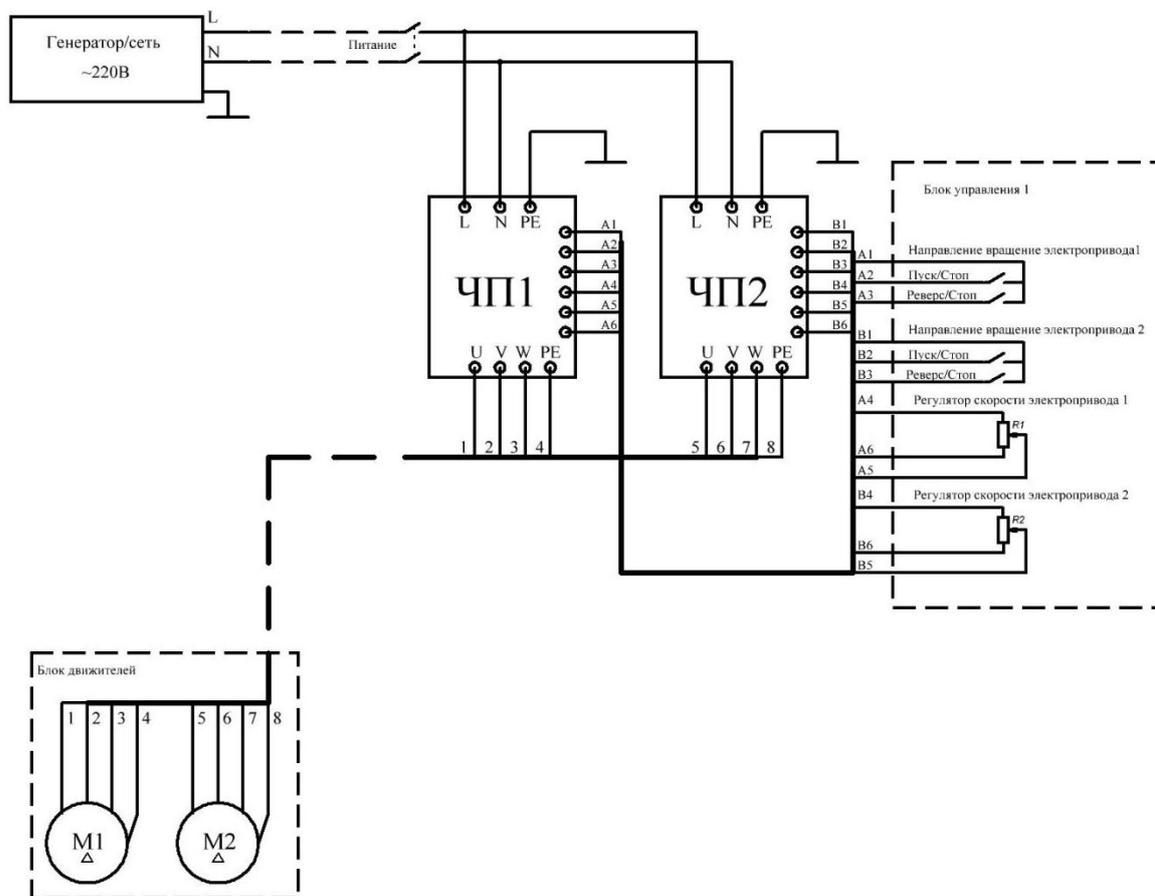


Рис. 5. Схема с использованием проводного пульта управления

Вариант схемы управления мобильным роботом с побортным объединением механизмов шагания включает персональный компьютер (ПК) и преобразователь сигналов (рис. 6). С помощью ПК и программного обеспечения осуществляется управление частотными преобразователями и получение информации [10]. Достоинствами данного метода являются точность управления и возможность хранения данных. Использование ПК и программного

обеспечения позволяет осуществлять более точное и гибкое управление частотными преобразователями; полученная информация может быть сохранена для дальнейшего анализа и обработки. Недостатками являются сложность установки и настройки программного обеспечения. Для работы системы требуется постоянное подключение к персональному компьютеру, что может создать определенные неудобства при использовании в полевых условиях.

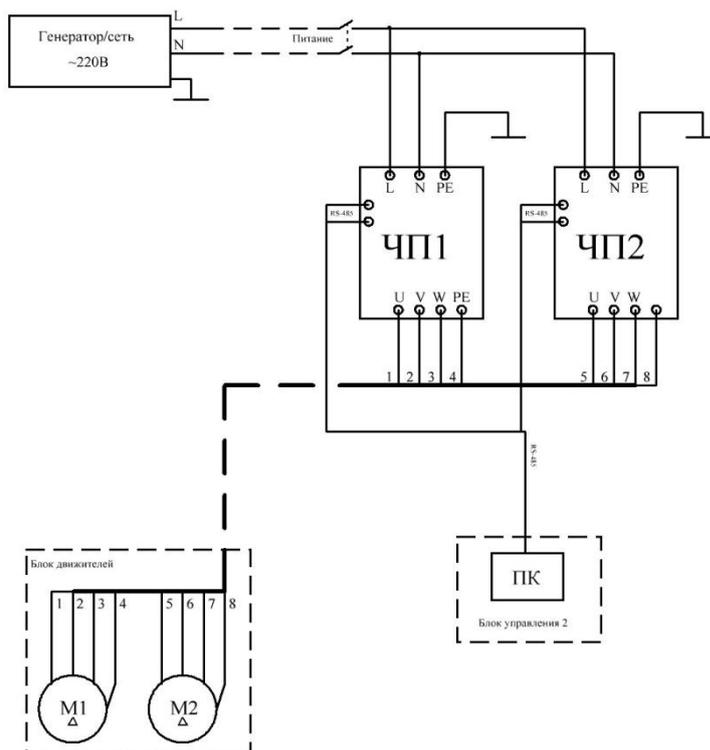


Рис. 6. Схема системы управления через ПК

Дистанционное управление (рис. 7) состоит из двух частей: пульта управления и приемной части, которая подключается к частотным преобразователям и устанавливается вместе с ними в герметичном кейсе. Основу системы управления составляют два микроконтроллера: один – в пульте управления, другой – в приемной части. Информация передается по радиоканалу, и дальность передачи зависит от вида радиопередатчиков и особенностей окружающей среды.

Система позволяет организовать простые движения, такие как движение вперед, поворот на определенный угол, поворот на месте и т. д. Дополнительно возможен сбор данных с ЧП и дополнительных датчиков состояния робота, для передачи на пульт управления и отображения на дисплее. Система дистанционного

управления может быть уязвима для помех от других радиоустройств, что может привести к сбоям в управлении роботом. Настройка и программирование требуют определенных навыков и знаний в области программирования и электроники. Потеря радиосигнала между пультом и приемником может произойти в результате преград между ними или проблем с электропитанием, что ставит под угрозу безопасность работы робота. Система управления не учитывает возможные динамические перегрузки, возникающие в электродвигателях и ПЧ при движении робота по неорганизованной поверхности при заклинивании, или застревание опор робота и, как следствие, возникновение сверхтоков в системе, что может привести к аварийному отключению частотного преобразователя и потере работоспособности робота [11].

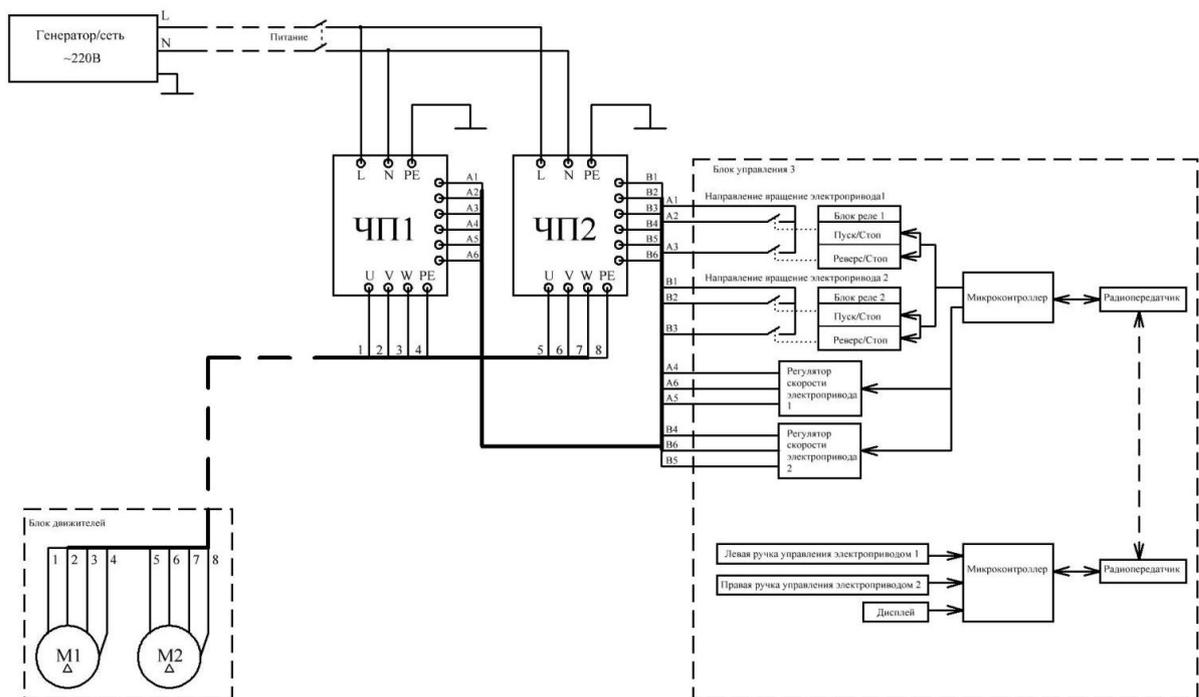


Рис. 7. Схема системы дистанционного управления

Выбор метода управления должен быть обоснован оценкой конкретных потребностей и условий применения. Дистанционное управление с пульта может быть эффективно использовано при требовании простоты, низкой квалификации оператора и стоимости блока управления, тогда как системы управления с использованием компьютера и программного обеспечения, а также дистанционное управление с добавленными функциями программирования могут быть необходимы при востребованной высокой точности, гибкости, возможности адаптации и достаточной квалификации оператора.

Рассмотренные варианты системы управления двигателями мобильных роботов с бортно расположенными цикловыми шагающими движителями обеспечивают реализацию программного движения корпуса мобильного робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловский, В. Е. О разработках шагающих машин / В. Е. Павловский // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2013. – № 101. – С. 1–32.
2. RHex : A Biologically Inspired Hexapod Runner / R. Altendorfer, N. Moore, H. Komsuolu [et al.] // Autonomous Robots. – 2001. – Vol. 11, No. 3. – P. 207–213.
3. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, В. В. Жюга, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов. – М. : Машиностроение, 2009. – 191 с.
4. Голубев, Ю. Ф. Экстремальные локомоторные возможности инсектоморфных роботов / Ю. Ф. Голубев, В. В. Корянов. – М. : Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, 2018. – 212 с.
5. Шаронов, Н. Г. Синтез алгоритма управления движением шагающей машины «Восьминог» в зависимости от параметров локального препятствия / Н. Г. Шаронов // Известия ВолГГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 (71) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2010. – С. 35–40.
6. Определение относительного положения локальных препятствий при удаленном управлении движением шагающей машины / Д. Н. Покровский, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов, Я. В. Калинин // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 2 (157) / ВолГГТУ. – 2015. – С. 184–188.
7. Дистанционные сенсоры в контуре управления сервисных и подводных роботов / В. Е. Пряничников, В. В. Чернышев, Д. А. Воркутов [и др.] // Экстремальная робототехника. – 2021. – № 1 (32). – С. 110–116.
8. Чернышев, В. В. МАК-1 – подводный шагающий робот / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2 (7). – С. 45–50.
9. Особенности преодоления уклонов шагающими аппаратами / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев, И. П. Вершинина [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 234–240.
10. Супервизорное управление шагающей подводной базой с автономными роботами-спутниками / В. Е. Пряничников, В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – Т. 16, № 12. – С. 49–56.
11. Ветлицын, М. Ю. Проблемы реализации защит электродвигателей в условиях современного технологического процесса / М. Ю. Ветлицын, Ю. А. Ветлицын // Заваляшинские чтения 23 : Сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике. – СПб.: СПб ГУАП, 2023. – С. 283–287.

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: ianovakov@vstu.ru

Темплан 2024 г. Поз. № 7ж. Дата выхода в свет 16.04.2024 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 9,94.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 255.

Отпечатано в типографии Издательства ВолГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

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* 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.