

ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского
государственного
технического
университета

ISSN 1990-5297



Серия
Роботы, мехатроника
и робототехнические системы

16+

№ 9 (280)
2023

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

Редакционная коллегия:

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

Серия

«РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА
И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ»

ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

Брискин Е. С., д.ф.-м.н., проф.

Горобоцов 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/](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

№ 9 (280)
Сентябрь
2023

УЧРЕДИТЕЛЬ:

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

Адрес редакции:

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

E-mail: president@vstu.ru

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

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

© Волгоградский государственный технический университет,

«Известия Волгоградского государственного технического университета», 2023

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:

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

Editorial board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SERIES "ROBOTS,
MECHATRONICS
AND ROBOTIC SYSTEMS"

IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY

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

Editorial board:

Chairman

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Executive secretary

Vershinina I.P.

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

International index of the journal
ISSN 1990-5297

The journal is distributed by subscription.
Index of the 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", 2023

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 9 (280)
September
2023

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

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

The journal is registered at the Federal Service on Control in the Sphere of Communication, IT and Mass Communications (Roscomnadzor)
Registration certificate ПИ № ФС77–61113 of March 19, 2015

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

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

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

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Алексеев В. В. 63
Бабаев М. С. 6
Бельченко Ф. М. 11, 15
Бордюгов Д. В. 21
Брискин Е. С. 21, 68
Васильев С. А. 63
Вершинина И. П. 31, 72
Волков И. В. 47
Воробьева Н. С. 59
Дроботов А. В. 47
Дяшкин А. В. 59
Дяшкин-Титов В. В. 59
Ермолов И. Л. 11
Жога В. В. 26, 31
Иванов А. Г. 59
Калинин Я. В. 6
Князьков М. М. 15
Леонард А. В. 33, 40
Макаров А. М. 47
Марчук Е. А. 51
Насари Задеган А. Х. 72
Нелюбова А. В. 26
Несмиянов И. А. 59
Остриков П. П. 11, 15
Пряничников В. Е. 72
Рыжков С. А. 47
Семенов Е. А. 15
Соловьева М. Д. 72
Степанова Д. К. 72
Суханов А. Н. 15
Федорова А. А. 63
Хачатрян А. А. 68
Чашухин В. Г. 15
Чернышев В. В. 72
Шаронов Н. Г. 21, 31, 51

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Бабаев М. С., Калинин Я. В.</i> Тросовый робот для мониторинга и обслуживания высотных зданий и сооружений.....	6
<i>Бельченко Ф. М., Ермолов И. Л., Остриков П. П.</i> Разработка программного модуля преобразования перспективы на видеонизображении для выбора и анализа элементов изображения.....	11
<i>Бельченко Ф. М., Князьков М. М., Остриков П. П., Семенов Е. А., Суханов А. Н., Чащухин В. Г.</i> Исследования газодинамических и гидродинамических процессов в полостях и каналах вакуумных захватных устройств.....	15
<i>Бордюгов Д. В., Брискин Е. С., Шаронов Н. Г.</i> Исследование принципов движения мобильного робота с внутренней массой, совершающей движение по окружности.....	21
<i>Жога В. В., Нелюбова А. В.</i> Определение кинематических параметров исполнительных приводов для реализации программных траекторий.....	26
<i>Жога В. В., Шаронов Н. Г., Вершинина И. П.</i> Динамическая модель подводного робота с манипуляторами.....	31
<i>Леонард А. В.</i> Особенности планирования движения наземного робота с обходом стационарного препятствия на основе подхода VC/APF+BC _r ¹ ...	33
<i>Леонард А. В.</i> Планирование движения робота с обходом статичного препятствия на основе решения вариационной задачи при заданных начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени.....	40
<i>Макаров А. М., Дроботов А. В., Волков И. В., Рыжков С. А.</i> Особенности совместного использования двухосевого поворотного стола и шестиосевого манипулятора в аддитивном производстве.....	47
<i>Марчук Е. А., Шаронов Н. Г.</i> Распределение сил натяжения в системе тросового параллельного робота в формализации теории игр.....	51
<i>Несмиянов И. А., Дячкин А. В., Воробьева Н. С., Иванов А. Г., Дячкин-Титов В. В.</i> Автоматизированная система контроля влажности зерна при хранении гуртовым способом.....	59
<i>Федорова А. А., Васильев С. А., Алексеев В. В.</i> Оптимизация мехатронного профилографа перемещением датчика сканирования по прямолинейной траектории.....	63
<i>Хачатрян А. А., Брискин Е. С.</i> Об управлении движением трехопорного мобильного робота по вертикальной плоскости.....	68
<i>Чернышев В. В., Вершинина И. П., Насари Задеган А. Х., Пряничников В. Е., Соловьева М. Д., Степанова Д. К.</i> Влияние числа ног в движителе на динамическую нагруженность привода шагающих машин с механизмами шагания циклового типа.....	72

М. С. Бабаев¹, Я. В. Калинин²

ТРОСОВЫЙ РОБОТ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ОБСЛУЖИВАНИЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

¹ Волгоградский государственный технический университет
² Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова
jkv83@mail.ru

В работе дается обзор современного состояния строительной отрасли в плане роботизации рутинных, сложных и опасных для человека технологических операций.

Ключевые слова: строительство, робот для строительства, мониторинг зданий и сооружений.

M. S. Babaev¹, Ya. V. Kalinin²

ROBOT FOR BUILDING REVIEW

¹ Volgograd State Technical University
² The Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute

The work provides an overview of the current state of the construction industry in terms of robotization of routine, complex and dangerous technological operations for humans.

Keywords: building, robot for building, monitoring of buildings and structures.

Строительная отрасль по-прежнему является одновременно одной из самых трудоемких, но наименее автоматизированных и роботизированных отраслей промышленности. Самая тяжелая и опасная работа, как и ранее, остается в руках людей, несмотря на быстрое развитие автоматизации и робототехники. При возведении и обслуживании зданий и сооружений, особенно высотных, возникает ряд специфических проблем, из-за которых автоматизация усложняется. Автоматизированные роботизированные системы отлично справляются с повторяющимися задачами в узком диапазоне вариативности, строительные работы же, напротив, многообразны и непредсказуемы, нуждаются в привлечении на место работ разных специалистов на протяжении всего процесса. Отдельно следует отметить и внешние факторы, такие как погода и ландшафт, которые могут меняться в любой момент, и также привносят специфические проблемы и особенности.

Актуальной проблемой в большинстве стран мира является производственный травматизм как следствие несчастных случаев и аварий.

Охрана труда в строительстве – это взаимосвязь социально-экономических, законодательных, технических, гигиенических и организационных мероприятий. Основной ее целью является ограждение здоровья строителей от несчастных случаев и профессиональных заболеваний, а также обеспечение благоприятных условий труда для повышения производительности и качества выполняемых работ. Крайне важными работами являются высотные работы, связанные со строительством, ремонтом, мониторингом и обслуживанием высотных зданий и сооружений. При этом, если строительные работы считаются сложными как сами по себе, так и в плане автоматизации и роботизации, то работы, связанные с мониторингом, обслуживанием и мелким ремонтом высотных зданий и сооружений, вполне могут быть роботизированы, как за счет их меньшей сложности и вариативности, так и за счет того, что на готовом здании можно заложить, в том числе на этапе строительства, вспомогательные устройства и оборудование для использования простых и надежных роботов вертикального перемещения.

В настоящее время различными научными коллективами широко исследуются способы перемещения роботов по вертикальным поверхностям.

Изучаются способы перемещения при помощи вакуумных фиксаторов [1] и магнитных захватов [2]. Активно развивается направление, изучающее перемещение роботов с механическими и адгезионными захватами [3].

В то же время известны и также широко исследуются способы перемещения при помощи тросовых движителей [4, 5].

Предложен алгоритм решения задачи статического равновесия квазистатических шагающих роботов с любым количеством тросов и опор [5].

Роботы, использующие вакуумные фиксаторы [1], могут работать на ровных, сплошных поверхностях с низкой шероховатостью, так как разрывы на поверхности, неровности и другие дефекты не позволяют надежно зафиксировать опоры. Таким образом, подобные роботы чувствительны к типу опорной поверхности. Роботы с магнитными фиксаторами [2] также имеют ограниченный круг применения, прежде всего на магнитных поверхностях. Также недостатком большинства роботов данного типа является необходимость затраты энергии в процессе удержания робота на вертикальной поверхности (затраты на поддержание вакуума и электромагнитного поля).

Роботы с механическими захватами требуют наличия регулярных неровностей на вертикальной поверхности, на которые они смогут опираться, а также имеют сложную систему управления. Роботы с адгезионными захватами [3, 6] кажутся наиболее универсальными, но разработанные на данный момент адгезионные захваты в процессе использования быстро изнашиваются и теряют свои свойства, в первую очередь понижается их несущая способность.

Роботы, использующие тросовые движители [4–6], обычно рассматриваются как устройства для перемещения в пространстве, а перемещение по поверхности в таких случаях не рассматривается. В тех случаях, когда подразумевается перемещение по поверхности за счет других движителей, тросовые движители выступают в качестве страхующих, а не основных движителей.

Исследуются тросовые роботы и в трудах А. В. Малолетова и Е. А. Марчука [7–10]; в них анализируются современные тросовые роботы,

в том числе созданные и исследуемые в Университете Иннополис, показаны проблемы и направления их решения при проектировании и эксплуатации тросовых роботов: учет нелинейности тросовых элементов, позиционные ошибки тросовых систем с избыточными связями, задачи их компенсации.

Тросовым роботам посвящены работы М. И. Ефимова и Е. С. Брискина [11–13], в которых описывается конструкция колесно-тросового робота, способного перемещаться по вертикальным поверхностям за счет прижима к поверхности и свободного вращения опорных колес при наматывании несущих тросов на тяговые барабаны, обеспечивающие подъем и перемещение по вертикальной плоскости. Также приводятся результаты натуральных экспериментов на лабораторном макете, показывающие принципиальную возможность применения такого робота, границы применимости, проблемы, которые необходимо решать (например, преодоление незначительных препятствий); они успешно решаются в последующих работах).

В результате проведенного обзора и патентного поиска можно сделать вывод о значительных перспективах внедрения тросовых роботов в строительной отрасли при замене ручного или механизированного труда человека роботами при мониторинге, обследовании, обслуживании высотных зданий и сооружений, когда труд человека является опасным.

Наиболее рациональна разработка робота, удерживаемого тросами на вертикальной поверхности, а его прижатие к вертикальной поверхности должно регулироваться при помощи управления параметрами робота. При расчете таких параметров, как положение опор робота, центра тяжести или точки приложения силы натяжения троса, планируется обеспечить его надежное прижатие и, таким образом, осуществить перемещение робота по поверхности, в том числе с выполнением технологических операций, требующих устойчивое положение и точное позиционирование робота. При этом учитываются ориентация тросов, устанавливаемая углами, а также силы трения в опорах в качестве условия реализации надежного удержания робота на вертикальной поверхности. Однако надежное «прижатие» робота в широком диапазоне его положения на вертикальной поверхности, хоть и возможно рассчитать, но такие поверхности должны быть идеальными, что на практике, в условиях строительства, недос-

тижимо. В работе [8] рассчитаны силы для робота (рис. 1), удерживаемого двумя тросами и

имеющего четыре опоры, движущегося по ровной вертикальной поверхности.

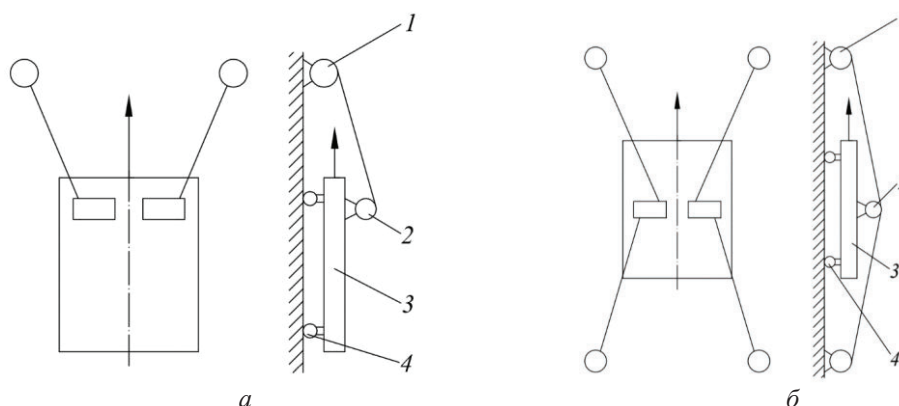


Рис. 1. Робот-прототип [13] (а) и предлагаемый вариант робота для мониторинга высотных зданий и сооружений (б): 1 – опорный барабан троса; 2 – тяговый барабан троса; 3 – корпус робота; 4 – пассивные опорные колеса

Предлагается вариант развития робота, показанного на рис. 1, а, в виде дополнения его тросов ветвями, идущими вниз (рис. 1, б), что позволяет осуществлять более надежный и управляемый прижим робота к поверхности; движение по вертикальным поверхностям с отрицательными углами наклона к нормали; движение по горизонтальным поверхностям, когда вектор силы тяжести пытается оторвать робот от опорной поверхности.

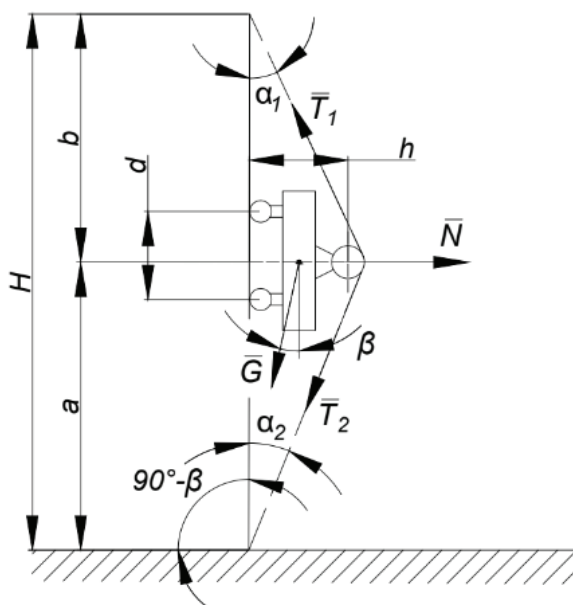


Рис. 2. Расчетная схема колесно-тросового робота на наклонной поверхности (при $\beta = 0$ на вертикальной поверхности)

Математическая модель предлагаемого робота в соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 2:

$$T_1 \sin \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2 - N + G \sin \beta = 0,$$

$$T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2 - G \cos \beta = 0.$$

Исходя из расчетной схемы (рис. 2), получаем кинематические соотношения для длин и углов наклона ветвей троса:

$$l_1 = \sqrt{h^2 + (H - a)^2}, \quad \alpha_1 = \arctg \frac{h}{H - a},$$

$$l_2 = \sqrt{h^2 + a^2}, \quad \alpha_2 = \arctg \frac{h}{a}.$$

Исходя из формулы для удлинения тросов, известной из общего курса сопротивления материалов, получаем выражения для определения удлинений тросов в каждой точке:

$$\Delta l_1 = \frac{T_1 l_1}{E_1 A_1},$$

$$\Delta l_2 = \frac{T_2 l_2}{E_2 A_2},$$

где E_i , A_i – соответственно модуль упругости и площадь сечения каждого из тросов.

Производя стандартные преобразования, получаем выражения для усилий в тросах:

$$T_1 = \frac{N - G \sin \beta + G \frac{h}{a} \cos \beta}{\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_1},$$

$$T_2 = \frac{N - G \sin \beta - G \frac{h}{H - a} \cos \beta}{\sin \alpha_2 + \cos \alpha_2 \operatorname{tg} \alpha_1}.$$

Для условного робота массой 100 кг, имеющего высоту оси барабана над опорной поверхностью $h = 0,8$ м, колесную базу опорной тележки $d = 0,5$ м, с одинаковыми тросами диа-

метром 6 мм, которые могут с запасом обеспечить перемещение такого робота, с параметрами $E_1 = E_2 = 1,6 \cdot 10^{11}$ Па; $A_1 = A_2 = 28,26 \cdot 10^{-6}$ м², получаем два вида графиков: для перемещения по вертикальной поверхности ($\beta = 0^\circ$) и для перемещения по поверхности с отрицательным наклоном ($\beta = -30^\circ$). Прижим к опорной поверхности полагается одинаковым для обоих случаев и равным $N = 100$ Н.

На рис. 3 приведен график суммарной длины тросов, который не зависит от угла наклона к горизонту, при этом видно, что на краях рабочего пространства суммарная длина меняется существенно, что говорит о том, что нижняя и верхняя ветви тросов изменяют длины по-разному, что приводит к невозможности использования одного барабана и для верхней,

и для нижней ветвей. При этом после 15 м от начала рабочего пространства и за 15 м до его конца изменения суммарной длины тросов незначительны по сравнению с удлинениями тросов от возникающих усилий. Такое же явление наблюдается и для робота-прототипа, но только на конце рабочего пространства, при приближении к верхней точке.

С этим явлением можно бороться либо применением разделенных барабанов, либо ограничением рабочего пространства робота, либо комбинированием движений – в нижней части рабочего пространства робот движется как робот-прототип, имея только одну верхнюю ветвь троса, с последующим подключением нижней ветви.



Рис. 3. Суммарная длина тросов при перемещении робота вдоль рабочего пространства

На рис. 4 показаны усилия натяжения тросов при перемещении робота вдоль рабочего пространства: на рис. 4, а – по вертикальной поверхности ($\beta = 0^\circ$); на рис. 4, б – по поверхности с отрицательным наклоном ($\beta = -30^\circ$),

при этом можно видеть, что при перемещении по вертикали максимально достижимая высота – 192 м; при отрицательном наклоне в 30° может быть достигнуто перемещение по усилиям в тросах 199 м.

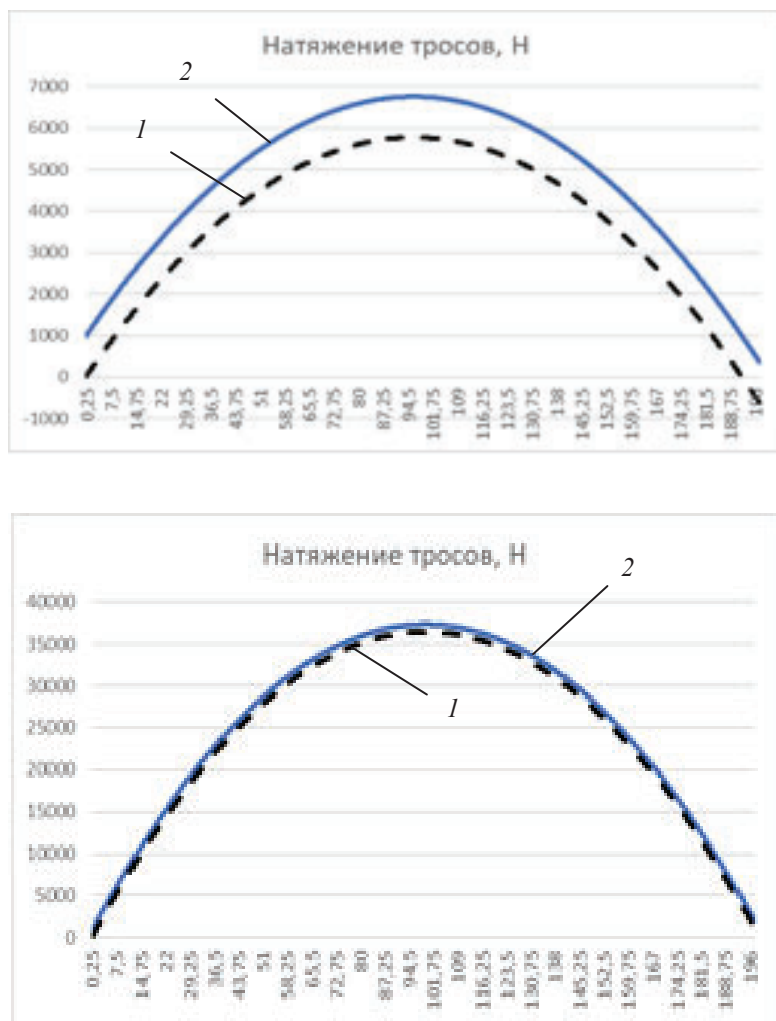


Рис. 4. Натяжения тросов при перемещении робота вдоль рабочего пространства:
 $a - \beta = 0^\circ$; $b - \beta = -30^\circ$: 1 – верхняя ветвь троса, 2 – нижняя ветвь троса

Также наблюдаются более высокие усилия натяжения тросов при отрицательном наклоне, так как составляющая силы тяжести оказывает большее влияние. При перемещении вдоль вертикали натяжения в верхней и нижней ветвях троса существенно различаются; при перемещении вдоль поверхности с отрицательным наклоном различия в натяжении тросов практически исчезают.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий [и др.]. – М.: Наука, 2001. – 369 с.
2. Быков, Н. В. Робот с магнитно-ленточным принципом вертикального перемещения / Н. В. Быков, Н. С. Власова, М. Ю. Губанов // Экстремальная робототехника: Труды Международной научно-технической конференции. – СПб.: Гангут, 2019. – С. 122–123.
3. Silva, M. A survey of technologies for climbing robots adhesion to surfaces / M. Silva, J. Machado, J. Tar // Proc. of the 6th IEEE Conference on Computational Cybernetics, November 27–29, 2008, Stara Lesna, Slovakia. – Pp. 127–132.
4. Qian, Sen & Zi. A Review on Cable-driven Parallel Robots / Qian, Sen & Zi, Bin & Shang, Wei-Wei & Xu, Qing-Song // Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018. 31. 66. 10.1186/s10033-018-0267-9.
5. Zoppi, M. Equilibrium analysis of multi-limbs walking and climbing robots / M. Zoppi, R. Molfino // Auton Robot, 2006, 21. – Pp. 199–210.
6. Zoppi, Matteo & Sgarbi, S & Molfino, Rezia & Bruzzone, Luca. Equilibrium analysis of quasi-static, multi-griped walking robots, 2020.
7. Пат. 2791827 C1 Российская Федерация, МПК E04G 21/02, E04B 1/35, E04B 1/16. Тросовая система с пассивным динамическим гасителем колебаний / А. В. Малолетов, Е. А. Марчук; Университет Иннополис. – 2023.
8. Марчук, Е. А. О численном моделировании области рабочего пространства гибридного тросового робота / Е. А. Марчук // Известия ВолГГТУ: научный журнал № 4 (275) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 64–71.
9. Марчук, Е. А. Компенсация отклонений мобильной платформы параллельного тросового робота по силам натяжения тросов / Е. А. Марчук, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – № 2. – С. 113–123.

10. О выборе математических моделей висячих элементов при проектировании крупногабаритного параллельного тросового робота / Е. А. Марчук, Я. В. Калинин, М. А. Иванов, А. В. Малолетов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 56–62.

11. Ефимов, М. И. Об усилиях, действующих на тросовый робот, перемещающийся по ровной вертикальной поверхности / М. И. Ефимов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (263) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. –

(Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 31–37.

12. Ефимов, М. И. Экспериментальное исследование движения тросового робота по ровной вертикальной поверхности / М. И. Ефимов, П. С. Артемьев, Г. Ю. Прокудин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 28–33.

13. П. м. 201924 Российская Федерация, МПК E04G23/00. Тросовый робот вертикального перемещения / Е. С. Брискин, М. И. Ефимов, Н. Г. Шаронов ; ВолгГТУ. – 2021.

УДК 621.865.8-182.3: 623

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-11-15

Ф. М. Бельченко, И. Л. Ермолов, П. П. Остриков

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВЫ НА ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИИ
ДЛЯ ВЫБОРА И АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ***

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук

philepp@mail.ru, ermolov@ipmnet.ru, ostricov93@yandex.ru

Исследуются пути повышения эффективности работы модуля предоставления информации оператору с видеосенсоров и систем телеметрии. Описанные проводимые в настоящее время разработки сделаны на базе библиотек OpenCV и PyGame. Целью работы является повышение эффективности работы операторов робототехнических систем при выявлении различных изменений на местности. В качестве инструмента предлагается использование программного модуля изменения перспективы на видеоизображениях, получаемых от систем технического зрения. Разработан прототип модуля, позволяющий оператору вручную изменять перспективу на видеоизображениях. Проведено испытание модуля на примере изображений аэрофотосъемки.

Ключевые слова: обработка изображений, слежение, перспективные преобразования, системы технического зрения.

F. M. Belchenko, I. L. Ermolov, P. P. Ostrikov

**DESIGNING SOFTWARE MODULE FOR IMAGES' PERSPECTIVE
TRANSFORMATION AND VISUAL ELEMENTS ANALYSIS**

**Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics
of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS)**

This paper studies a new approach to improve efficiency of modern surveillance and telemetry systems in robotics. Described and ongoing researches are created with OpenCV and PyGame libraries. A main goal of the study is to improve efficiency of human operator while inspecting or diagnosing various emerging situations. As a key solution we propose to introduce target distortions into images received from surveillance cameras. A prototype module has been developed which allows operator to manually change the perspective on video images. The module was tested on the aerial photography images.

Keywords: image processing, tracking, perception transformation, machine vision.

Человек-оператор в цепи управления техническими системами с участием видеонаблюдения является ключевым звеном. При этом он сильно ограничен техническими возможностями информационных средств передачи и получения информации; ему свойственно допускать ошибки принятия решений; он подвержен стрессу, усталости. Следовательно, необходимо проводить разработки, облегчающие и повышающие эффективность работы оператора [1].

При этом операторы БПЛА сталкиваются с определенными трудностями восприятия информации от средств телеметрии БПЛА. Это касается, в первую очередь, осознания и идентификации изображений, выводимых средствами телеметрии на пульт управления БПЛА. Как правило, такое изображение получается со значительной высоты, иногда строго вертикально по отношению к изучаемой местности. На это накладывается сложность восприятия информа-

© Бельченко Ф. М., Ермолов И. Л., Остриков П. П., 2023.

* Часть работы над данным материалом выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 123021700055-6).

ции с небольшого размера экрана пульта управления БПЛА. По мнению авторов, было бы целесообразным получить возможность программно изменять угол обзора передаваемых изображений, чтобы оператор мог выбрать угол, интуитивно наиболее удобный для восприятия конкретным оператором, исходя из его психосоматических особенностей, усталости, опыта управления БПЛА и прочего.

В настоящей работе предложен ряд решений по совершенствованию систем представления видеоинформации для операторов телеуправляемых РТК [2]. В качестве основного решения предлагается применить наработки в области теории отображения перцептивного пространства, ранее успешно использовавшиеся в космической отрасли [3]. Благодаря современному стремительному развитию и удешевлению систем технического зрения и видеонаблюдения данные разработки стало возможно широко внедрять в робототехнике, системах видеоконтроля и диагностики [4].

На базе лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского в настоящее время начата разработка тестового варианта программного обеспечения, позволяющего оператору в реальном времени преобразовывать перспективу на изображении. За основу для разработок взята библиотека OpenCV для работы с системами технического зрения и библиотека PyGame для реализации человеко-машинного взаимодействия с оператором.

Разработан прототип программного обеспечения для пультов управления оператора. Основу данной программы составляют пять модулей:

1. Модуль инициализации видеокамеры.
2. Обработчик, осуществляющий получение информации с видеокамеры и проводящий первичную обработку видеоизображения.
3. Модуль обработки сигналов от компьютерной мыши/джойстика, обеспечивающий выбор угловых точек.
4. Модуль изменения перспективы на изображении.
5. Модуль обработки сигналов от клавиатуры/джойстика, для обеспечения ручного преобразования перспективы.

Данная программа выводит изображение, полученное от средств передачи видеоинформации на экран. Оператор может выделить интересующую его область с помощью мыши

или джойстика, после этого будет произведено преобразование перспективы выбранной области и приведение ее к виду, параллельному плоскости экрана (вид сверху). После этого оператор получает возможность произвести ручное преобразование перспективы, а именно поворот интересующей области относительно плоскости экрана монитора.

Модуль инициализации видеокамеры – стандартный блок в библиотеке OpenCV, производящий инициализацию оборудования и настройку матрицы камеры.

Обработчик, осуществляющий получение информации с видеокамеры и проводящий первичную обработку видеоизображения, производит генерацию изображения в памяти ЭВМ и ее дальнейшее преобразование в формат, воспринимаемый модулем PyGame.

Модуль обработки сигналов от компьютерной мыши/джойстика, обеспечивающий выбор угловых точек, производит выбор интересующей оператора области от рисовки этой области на изображении.

Модуль изменения перспективы на изображении сначала производит передачу координат угловых точек и расчета размера результирующего изображения (рис. 1).

Далее происходит расчет матрицы преобразования перспективы M с помощью функции `getPerspectiveTransform`, в которую передаются форма исходного и результирующего участка, выбранного оператором, в виде координат выбранных точек и координат точек, рассчитанных на предыдущем шаге (рис. 2).

Далее функция `warpPerspective` применяет перспективное преобразование к выбранной области и получает новое изображение. При использовании данного алгоритма происходит преобразование перспективы, обеспечивающее отображение выбранной области, близкое к параллельной плоскости экрана.

Модуль обработки сигналов от клавиатуры/джойстика, для обеспечения ручного преобразования перспективы, производит изменения матрицы преобразования перспективы M с учетом заданных оператором углов поворота относительно плоскости экрана, путем добавления элементов матрицы поворота к соответствующим элементам матрицы преобразования перспективы (рис. 3), что позволяет произвести изменение перспективы в системе координат x, y, z на соответствующие углы i, j, p [5].

```

def wrap_image(src, coords): # передаем координаты выбранных точек на изображении
    global i,j,p
    pt_A = coords[0]
    pt_B = coords[1]
    pt_C = coords[2]
    pt_D = coords[3]

    #расчет длины и ширины преобразованного изображения
    width_AD = np.sqrt(((pt_A[0] - pt_D[0]) ** 2) + ((pt_A[1] - pt_D[1]) ** 2))
    width_BC = np.sqrt(((pt_B[0] - pt_C[0]) ** 2) + ((pt_B[1] - pt_C[1]) ** 2))
    maxWidth = max(int(width_AD), int(width_BC))

    height_AB = np.sqrt(((pt_A[0] - pt_B[0]) ** 2) + ((pt_A[1] - pt_B[1]) ** 2))
    height_CD = np.sqrt(((pt_C[0] - pt_D[0]) ** 2) + ((pt_C[1] - pt_D[1]) ** 2))
    maxHeight = max(int(height_AB), int(height_CD))

```

Рис. 1. Фрагмент кода с передачей координат угловых точек выбранного участка на изображении

```

input_pts = np.float32([pt_A, pt_B, pt_C, pt_D])
output_pts = np.float32([[0, 0],
                          [0, maxHeight - 1],
                          [maxWidth - 1, maxHeight - 1],
                          [maxWidth - 1, 0]])
M = cv2.getPerspectiveTransform(input_pts, output_pts)

```

Рис. 2. Создание матрицы перспективного преобразования

```

r_i = m.radians(i)
r_j = m.radians(j)
r_p = m.radians(p)

M = np.float32([[M[0,0]+k*np.float32(m.cos(r_j)*m.cos(r_p)),
                 M[0,1]-k*np.float32(m.sin(r_p)*m.cos(r_j)),
                 M[0,2]+k*np.float32(m.sin(r_j))],

                [M[1,0]+k*np.float32(m.sin(r_i)*m.sin(r_j)*m.cos(r_p)+m.sin(r_p)*m.cos(r_i)),
                 M[1,1]+k*np.float32(-m.sin(r_i)*m.sin(r_j)*m.sin(r_p)+m.cos(r_i)*m.cos(r_p)),
                 M[1,2]+k*np.float32(-m.sin(r_i)*m.cos(r_j))],

                [M[2,0]+k*np.float32(m.sin(r_i)*m.sin(r_p)-m.sin(r_j)*m.cos(r_i)*m.cos(r_p)),
                 M[2,1]+k*np.float32(m.sin(r_i)*m.cos(r_p)+m.sin(r_j)*m.sin(r_p)*m.cos(r_i)),
                 M[2,2]+k*np.float32(m.cos(r_i)*m.cos(r_j))]])

```

Рис. 3. Реализация динамического преобразования перспективы на изображении

Далее проведем испытание прототипа программного модуля на примере осуществления преобразования перспективы изображения помещения (рис. 4).

На рис. 4, а представлен выбранный оператор участок на изображении (в красной рамке); на рис. 4, б показан выбранный участок после преобразования. Как можно видеть, в ре-

зультате выбранный участок был развернут параллельно плоскости экрана, и стали более де-

тально видны элементы в дальнем нижнем углу выбранной области [6].



Рис. 4. Работа модуля перспективного преобразования для изображения помещений



Рис. 5. Работа модуля перспективного преобразования для изображения аэрофотосъемки

Проведем испытания данного программного модуля для изображений аэрофотосъемки (рис. 5).

На рис. 5, *а* представлен выбранный оператором участок на изображении (в красной рамке), на рис. 5, *б* – выбранный участок после преобразования. Работа данного модуля по-

зволяет детально изучать изображения для картографирования местности или поиска объектов. В зависимости от различных ситуаций оператор может производить ручное преобразование перспективы для более детального изучения интересных областей (рис. 6).



Рис. 6. Пример ручного изменения перспективы

В настоящее время в лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского проводятся исследования для совершенствования разрабатываемого модуля [6].

Модуль способен работать с видеопотоком, обеспечивая частоту обработки изображений 30 к/сек.

В дальнейшем на базе библиотеки PyGame планируется реализация программной оболочки для пульта управления на базе носимого электронного устройства, обеспечивающей работу с различными методами обработки изображений совместно с технологией преобразования видеоперспективы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ermolov, I.* Hierarchical data fusion architecture for autonomous systems // АСТА ИМЕКО. – 2019. – Vol. 8, no. 4.
2. *Бельченко, Ф. М.* Разработка системы видеонаблюдения с возможностью внесения целевых искажений отображаемого пространства совместно с алгоритмами сегментации / Ф. М. Бельченко, И. Л. Ермолов, П. П. Остриков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) /

ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 18–22.

3. *Kovalev, A. M.* O vizual'no vosprinimaemom prost-ranste predmetov [On the visually perceived space of objects] // Avtometriya, 2003, 39(6), pp. 3–12. (In Russian).

4. *Raushenbakh, B. V.* Geometriya Kartiny i Zritel'noe Vospriyatie [Image Geometry and Visual Perception] // Saint Petersburg: Azbuka-klassika Publ., 2002, p. 320. (In Russian).

5. Learning Image Processing with OpenCV / G. Garsia, O. Soares, G. Aranda, S. Tersero, O. Grasoia, N. Enano // Publisher Packt, USA, 2015. ISBN: 9781783287659 – 232 p.

6. *Belchenko, F. M.* A New Approach to Images' Perspective Transformation in Robotics Telemetry / F. M. Belchenko, I. L. Ermolov // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2021. – 22(12). – С. 644–649. (In Russ.).

7. *Belchenko, F. M.* Concept development of telemetry system for robotic systems with the ability to introduce targeted distortions of displayed space / F. M. Belchenko, I. L. Ermolov // Robotics and Technical Cybernetics. – St.Petersburg. – 2021. – Vol. 9. – № 1. – Pp. 26–31.

8. *Aliiev, R. N.* Preobrazovanie izobrazheniya s kamery mobil'nogo robota k sisteme perspektivnoy perspektivy [Transformation of the image from the camera of a mobile robot to the system of perceptual perspective] / R. N. Aliiev, I. L. Ermolov // Konferentsiya «Robototekhnika i mekhatronika-2015» v sostave MKPU-2015 [Proceedings of Conference «Robotics and Mechatronics-2015» as a part of MKPU-2015], 2015. (In Russian).

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-15-21

*Ф. М. Бельченко, М. М. Князьков, П. П. Остриков
Е. А. Семенов, А. Н. Суханов, В. Г. Чашухин*

ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛОСТЯХ И КАНАЛАХ ВАКУУМНЫХ ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ*

**Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского
Российской академии наук
Ipm_labrobotics@mail.ru**

В статье рассматриваются результаты исследований газодинамических и гидродинамических процессов в полостях и каналах вакуумных захватных устройств, функционирующих в воздушной, водной и смешанной средах. Получены переходные процессы, возникающие в полостях захватных устройств от момента включения питания генератора вакуума до момента установившегося уровня разрежения.

Ключевые слова: вакуумные захватные устройства, генератор вакуума, переходные процессы, мобильный робот вертикального перемещения, экспериментальный стенд.

*F. M. Belchenko, M. M. Knyazkov, P. P. Ostrikov
E. A. Semenov, A. N. Sukhanov, V. G. Chaschuhin*

STUDIES OF GAS-DYNAMIC AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN CAVITIES AND CHANNELS OF VACUUM GRIPPING DEVICES

**Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics
of the Russian Academy of Sciences**

The article discusses the results of studies of gas-dynamic and hydrodynamic processes in cavities and channels of vacuum gripping devices operating in air, water and mixed media. Transient processes were obtained that occur in the cavities of the gripping devices from the moment the vacuum generator is powered up to the moment of the steady-state vacuum level.

Keywords: vacuum gripping devices, vacuum generator, transients, mobile vertical movement robot, experimental stand.

Введение

В Институте проблем механики РАН, в лаборатории робототехники и мехатроники, долгие



Рис. 1. Мобильный робот вертикального перемещения на вертикальной поверхности нефтехранилища

В основном разработанные робототехнические системы функционировали в воздушной среде [1–2], однако в настоящее время возникла необходимость расширения областей применимости роботов вертикального перемещения за счет использования их в водной среде и на границе раздела «воздух – жидкость» [3–8]. Так, в лаборатории ведется разработка мобильных роботов, предназначенных для обслуживания корпусов судов (рис. 2).

В качестве вакуумных захватных устройств для удержания робота на поверхности перемещения используются присоски, а для генерации разряжения под ними – либо воздушные эжекторы, либо мембранный насос с пневматическим приводом. Оба способа генерации вакуума имеют как достоинства, так и недостатки. Так, воздушные эжекторы имеют большую эффективность в воздушной среде, а в водной их быстроедействие падает в несколько раз. В связи с этим были необходимы исследования, способные выявить особенности переходных процессов до момента установившегося уровня разрежения в полостях вакуумных захватных устройств робота и режимы работы эжектора, которые смогли бы компенсировать падение скорости генерации разряжения с помощью воздушного эжектора.

годы разрабатываются мобильные роботы, способные перемещаться по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям (рис. 1).

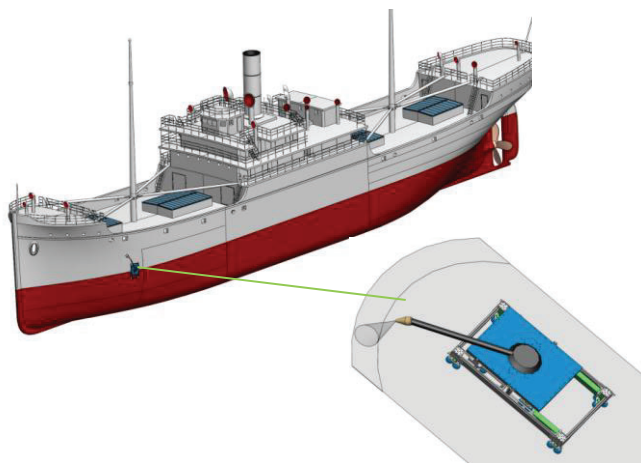


Рис. 2. Робототехнический комплекс вертикального перемещения выполняет операции по очистке корпуса судна

1. Разработка стенда для исследований газодинамических и гидродинамических процессов в полостях и каналах вакуумных захватных устройств

Разработка стенда была необходима для проведения исследований по верификации промышленно выпускаемых генераторов вакуума эжекторного типа с известными функциональными характеристиками и сравнения номинальных параметров с реальными данными, получаемыми при их использовании в вакуумных захватных устройствах.

На рис. 3 изображено схематичное представление организации проведения экспериментальных исследований динамики процессов, происходящих в вакуумируемой области присоски при различных начальных условиях при присасывании к стенке емкости. Начальные условия для каждой серии экспериментов определялись с учетом положения присоски относительно уровня воды.

Первая серия испытаний проводилась в воздухе для определения референсных значений параметров переходных процессов. Варьировались параметры входного давления, изменяемого регулятором.

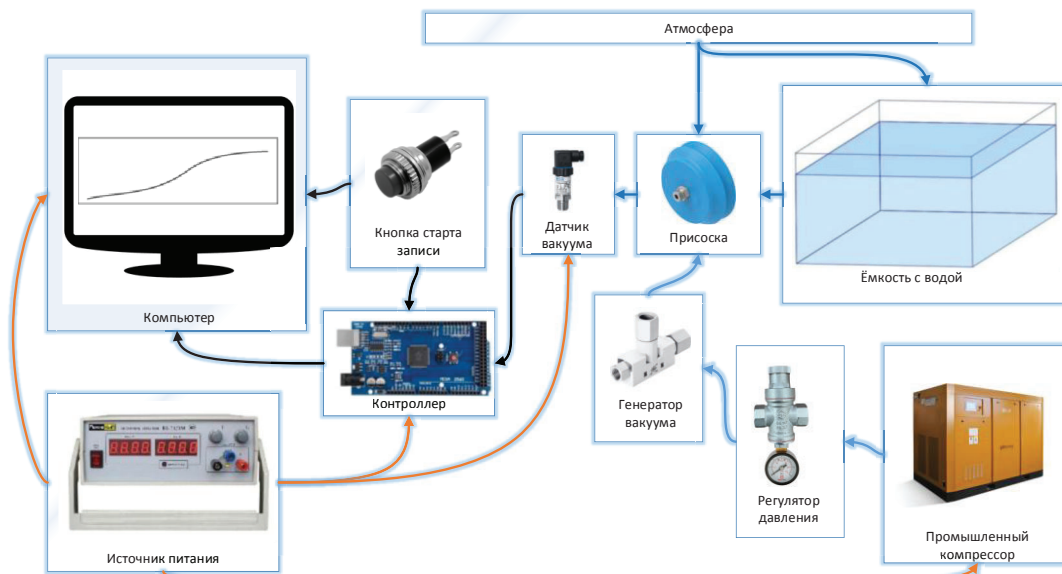


Рис. 3. Общая схема организации эксперимента

Следующая группа исследований предполагала нахождение половины присоски в воде. Проверялась гипотеза о наличии высокочастотных колебаний уровня вакуума в вакуумируемой области вследствие истечения крупных фракций жидкости в газе через выходное сопло с одновременным эффектом запираания эжектора по причине динамического изменения сечения этого сопла ввиду гидрофильности материала.

Последняя группа исследований была направлена на изучение динамики истечения воды из вакуумируемой области присоски при полном погружении присоски в воду. При этом также наблюдались высокочастотные колебания уровня вакуума вследствие попадания рабочего тела в камеру смешения в откачиваемую жидкость и перемешивания двух фаз в сопле истечения.

2. Обработка полученных на стенде экспериментальных значений параметров газодинамических и гидродинамических процессов в вакуумном захватном устройстве

В результате экспериментальных исследований были обнаружены переходные характеристики изменения уровня разрежения в вакуумируемой области от времени. Для создания разрежения использовались два генератора вакуума: эжектор VN-14-H, оптимизированный для получения высокого вакуума при низких скоростях всасывания, и эжектор VN-14-L, способный обеспечить очень быстрый эффект вакуумирования при относительно низком уровне вакуума. Данные по этим эжекторам были взяты с сайта производителя и представлены на рис. 4.

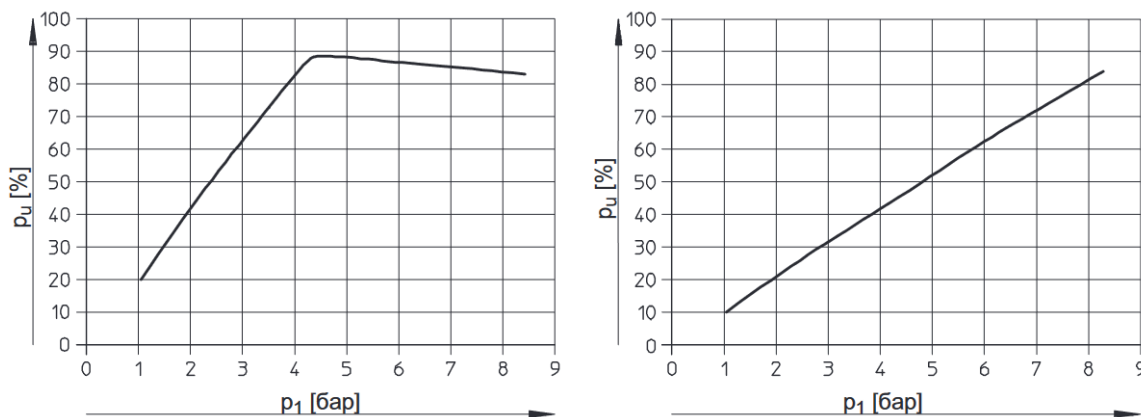


Рис. 4. Зависимости уровня разрежения P_u от рабочего давления P_1 (слева – эжектор типа VN-14-H; справа – эжектор типа VN-14-L)

В процессе проведения серий экспериментов варьировался уровень входного давления рабочего тела. Первая серия исследований проводилась при нахождении присоски в воздушной среде. Эта серия была направлена на верификацию данных производителя для текущей связки присоски и эжектора в условиях рабочего режима, для которого они были разработаны. На рис. 5 изображены результаты проведенной серии экспериментов для эжектора VN-14-H при давлении питания (входном давлении) в 2, 4 и 6 атмосфер.

Как видно из рис. 5, при превышении входного давления в 4,5 атмосферы на воздухе данный генератор вакуума должен терять эффективность ввиду эффекта запираания. В эксперименте было учтено наличие выходного канала, имитирующего конструктивные особенности присоски для работы в переменных средах, которые заключаются в удлиненном канале выхлопа эжектора. Вследствие этого уровень вакуума в вакуумном захватном устройстве оказался меньше, чем заявленный производителем.

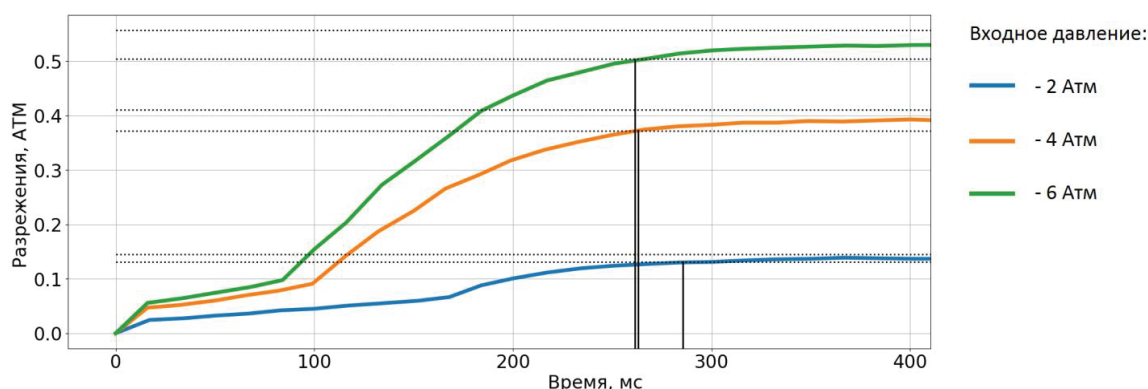


Рис. 5. Результаты первой серии экспериментов с генератором вакуума VN-14-H

Время переходного процесса, определяемое моментом попадания уровня разрежения в 5%-ую трубку точности относительно установившегося значения, для эксперимента с входным давлением в 2 атмосферы составляло 288 мс, в то время как увеличение входного давления до 4 и 6 атмосфер снижало это значение до 269 и 265 мс, соответственно. С момента подачи давления на вход генератора вакуума до некоторого времени, определяемого уровнем входного давления до наступления установившегося режима, можно увидеть небольшое проседание уровня разрежения, что объясняется процессами в трубках, соединяющих вакуумную камеру эжектора и вакуумируемую область в присоске.

В целом полученные результаты коррелируют с заявленными данными производителем.

Следующая серия экспериментов была проведена в нестандартной для данной конструкции рабочей среде, в которой уже присутствовала вода. Присоска была наполовину погружена в воду. При этом вода также присутствовала в камере вакуумирования присоски, доходя до центра отверстия для подачи вакуума в присоску. В данном эксперименте происходил забор водовоздушной смеси посредством работы эжектора VN-14-H. При подаче давления на вход генератора вакуума на выходе происходил выброс водовоздушной смеси. Динамика происходящих в камере вакуумирования процессов изображена на рис. 6.

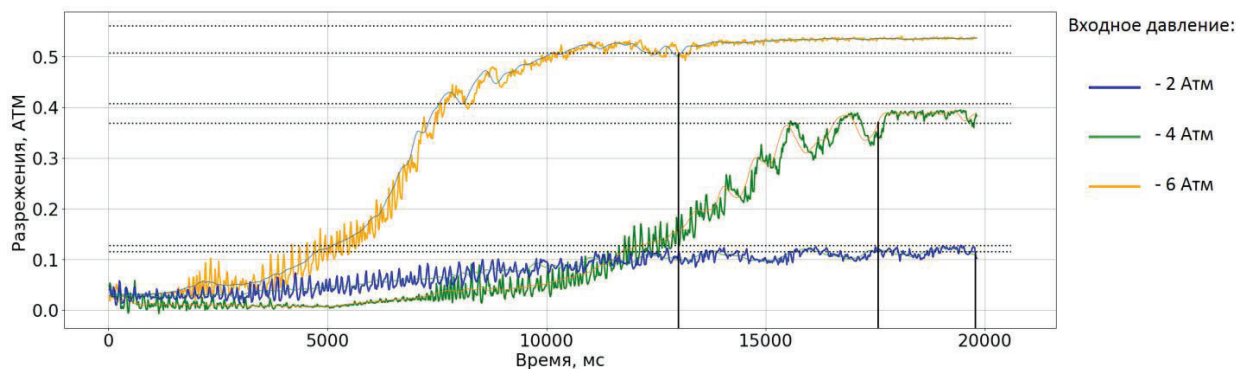


Рис. 6. Результаты серии экспериментов с эжектором VN-14-H на границе сред

В данном эксперименте наблюдался эффект возникновения высокочастотных колебаний. Этот эффект можно объяснить появлением капель воды в выпускном канале эжектора, которые, касаясь стенок канала, прилипают к нему и препятствуют движению основной массы водовоздушной смеси, образуя сужение канала более плотным веществом, чем воздух. При этом основная масса водовоздушной смеси выталкивается скопившиеся на стенках канала капли, очищая тем самым канал. Это происходит периодически, что и сказывается на эффекте колебаний разрежения. Видно, что в данном эксперименте существенно повышено время переходных процессов, что можно объяснить повышением плотности исходящего потока. Можно заметить, что при высоком давлении питания колебания прекращаются при достижении установившегося режима, что можно объяснить просушкой канала. Чем быстрее произойдет экстракция жидкости из вакуумируемой полости, тем быстрее начнется стадия просушки канала и дальнейший переход к установившемуся режиму работы вакуумного захватного устройства.

Необходимо дополнительно отметить, что в установившемся режиме вода еще оставалась в камере вакуумирования, но ее уровень был ниже заборного отверстия канала экстракции, и она не попадала в область смешивания. Отсюда можно сделать вывод, что установившийся режим наступит тем быстрее, чем быстрее

произойдет извлечение необходимого объема жидкости из камеры вакуумирования, чему может способствовать инжектирование воздуха в вакуумную полость перед присасыванием или силовое воздействие с внешней стороны на присоску для создания избыточного давления, способствующего быстрому извлечению необходимого объема жидкости.

Следующая серия экспериментов с генератором вакуума VN-14-H и присоской проводилась полностью в водной среде. В данном случае, в связи с тем, что через экстракционное отверстие в вакуумируемой области выходит только вода, усредненный график переходного процесса выглядит более гладко. Однако на выходе эжектора все равно образуется водовоздушная смесь так как в камере смешения встречаются две фазы: рабочее тело – воздух – и экстрагируемая жидкость. Поэтому также можно наблюдать эффект колебаний уровня вакуума. При этом есть предположение о возникновении эффекта кавитации (вскипание жидкости с выделением из нее растворенного воздуха) вследствие резкого падения давления в камере вакуумирования. Как только получившийся объем воздуха доходит до экстракционного отверстия камеры вакуумирования, происходит резкий выброс воздушной смеси через выпускной канал эжектора. Этот эффект четко прослеживается при высоком уровне давления питания и виден на рис. 7.

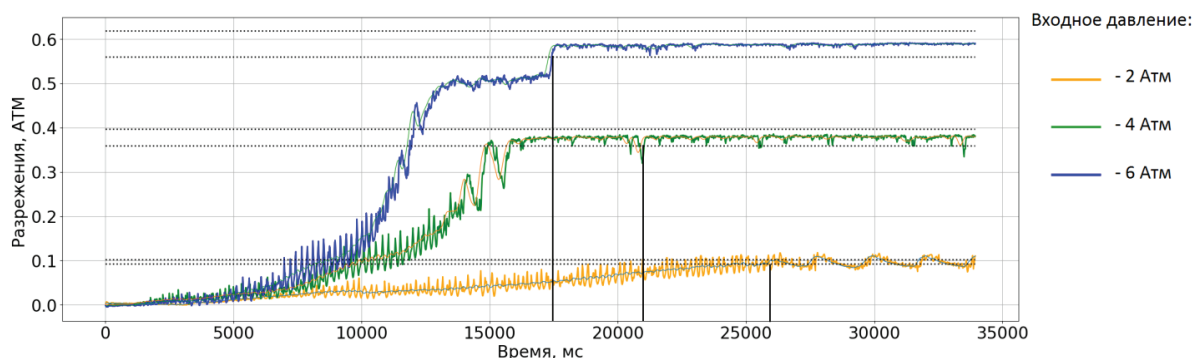


Рис. 7. Результаты серии экспериментов с эжектором VN-14-H в воде

Ввиду увеличения общего объема экстрагируемой жидкости время переходного процесса установления необходимого уровня вакуума также увеличивается. При малом давлении питания в установившемся режиме выходит тот объем воздуха, что питает эжектор. При этом в конце выхлопного канала в воде периодически образуются и схлопываются пузырьки газа, что приводит к колебаниям давления на

выходе. Этот эффект также виден на рис. 7.

Аналогичные серии экспериментов были проведены с генератором вакуума типа VN-14-L (рис. 8). Его особенностью является увеличенный диаметр выходного канала, который позволяет увеличить всасывающую способность эжектора. Однако при этом наблюдается снижение общего уровня разрежения, создаваемого при аналогичных уровнях питающего давления рабочего тела.

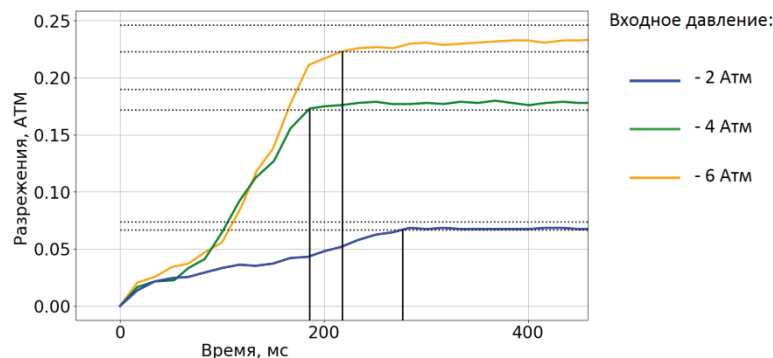


Рис. 8. Результаты первой серии экспериментов с генератором вакуума VN-14-L в воздухе

Данная серия экспериментов также подтверждает заявленные производителем рабочие характеристики генератора вакуума в воздухе. Работа экспериментального стенда в воздухе позволяет получить необходимый уровень ва-

куума при давлении питания в 2, 4 и 6 атмосферы за 287, 186 и 218 мс. Ввиду отсутствия жидкости в каналах системы колебательные эффекты не наблюдаются.

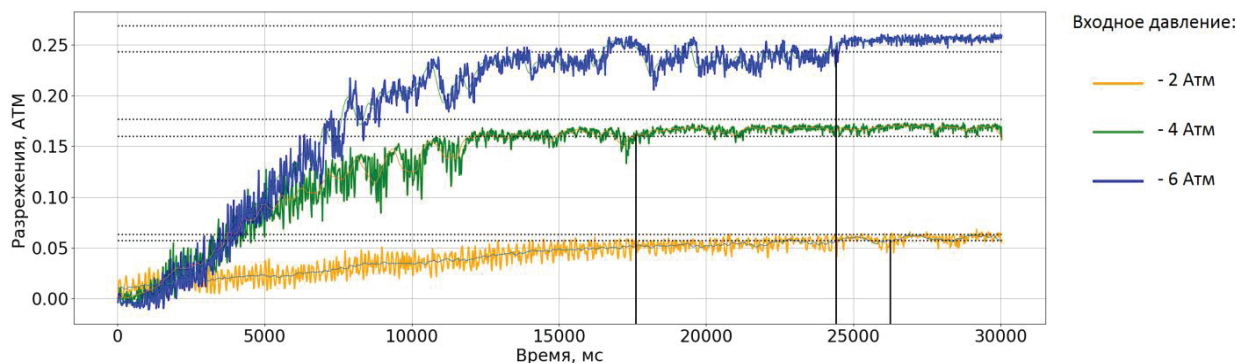


Рис. 9. Результаты серии экспериментов с эжектором VN-14-L на границе сред

Экспериментальные исследования с эжектором VN-14-L на границе сред показали схожую динамику изменения уровня вакуума в камере вакуумирования по сравнению с эжектором VN-14-H с тенденцией к увеличению времени переходных процессов и увеличению

амплитуды колебаний (рис. 9). Это можно связать с увеличением объема жидких фракций в водовоздушной смеси. Для более эффективного протекания процесса можно предложить дополнительно дробить данные фракции на выходе из эжектора с помощью ультразвука.

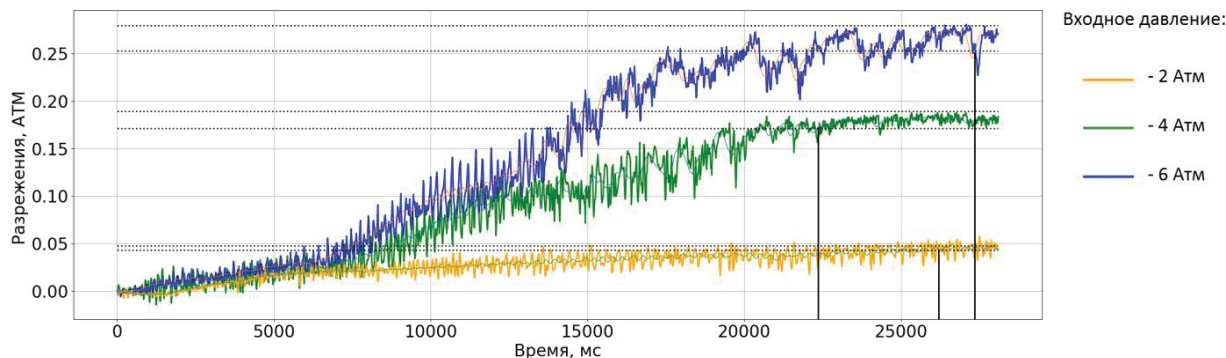


Рис. 10. Результаты серии экспериментов с эжектором VN-14-L в воде

В водной среде эжектор VN-14-L показывает результаты, изображенные на рис. 10. Здесь

видно, что данный тип генератора вакуума работает без существенных скачков в изменении

уровня разрежения благодаря более широкому каналу на выходе. Также можно заметить увеличенное время переходного процесса по сравнению с аналогичным экспериментом, проведенным с эжектором VN-14-Н. Эти эффекты объясняются меньшим уровнем генерируемого разрежения.

Заключение

По результатам анализа полученных переходных характеристик можно сделать следующие выводы. Существующие конструкции промышленно выпускаемых генераторов вакуума эжекторного типа существенно теряют свою производительность в водной среде и на границе сред «воздух – вода». Для повышения эффективности использования подобных генераторов вакуума без конструктивных изменений в водовоздушной и водной средах необходимо дополнительно использовать адаптивные алгоритмы управления. Подобные алгоритмы должны обеспечить вытеснение жидкости из вакуумируемой полости захватного устройства путем инжектирования рабочего тела непосредственно перед контактом захватного устройства с поверхностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адаптивные захватные устройства мобильных роботов с миниатюрными эжекторами / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17. – № 3. – С. 172–177.
2. Управляемое формирование вакуума в устройствах сцепления с поверхностями при движении мобильных роботов с аэродинамическим прижимом / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, Л. Н. Кравчук, А. А. Крюкова, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов, В. Г. Чашухин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18. – № 7. – С. 447–452.
3. Адаптация технологического оборудования для использования на мобильном робототехническом комплексе вертикального перемещения (МРК), спроектированного для работы на вертикальных и горизонтальных поверхностях нефте- и газохранилищ / И. Л. Ермолов, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов // Станкоинструмент. – 2022. – № 3 (28). – С. 58–64.
4. Hydrodynamic design of an underwater hull cleaning robot and its evaluation / Man Hyung Lee, Yu Dark Park, Hyung Gyu Park et. all // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, # 4, p.p. 335–352, DOI: 10.3744/JNAOE.2012.4.4.335.
5. Underwater Robotics: Surface Cleaning Technics, Adhesion and Locomotion Systems / Houssam Albitar, Kinan Dandan, Anani Ananiev and Ivan Kalaykov // International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, <https://doi.org/10.5772/62060>.
6. Design and Control of Underwater Wall Ranging Robot for Inspection of Nuclear Reactor / Y. S. Park, G. Y. Park, J. Yoon, B. J. Lee, W. Z. Oh // In: Zelinsky A. (eds) Field and Service Robotics. Springer, London, 1998. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1273-0_38.
7. Динамические процессы в вакуумных контактных устройствах роботов вертикального перемещения в водной среде / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, Е. А. Семенов, А. Н. Суханов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – № 7. – С. 417–421.
8. Particularities of Wall Climbing Robot Motion on Underwater Environments / V. G. Gradetsky, M. M. Knyazkov, E. A. Semenov, A. N. Sukhanov, V. G. Chashchukhin // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19. – № 9. – С. 608–611.

УДК 629.1.02

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-21-26

Д. В. Бордюгов, Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ВНУТРЕННЕЙ МАССОЙ, СОВЕРШАЮЩЕЙ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ*

Волгоградский государственный технический университет
denklopuk@gmail.com

Рассматривается метод управления роботом с внутренней массой, совершающей движение по окружности вокруг вертикальной оси робота. В процессе перемещения одна из опор находится в неподвижном контакте с поверхностью, в то время как другие – в фазе свободного перемещения относительно опорной поверхности. Это позволяет роботу проворачиваться вокруг неподвижной опоры.

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

D. V. Bordyugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov

THE RESEARCH OF THE MOTION PRINCIPLES OF THE MOBILE ROBOT WITH MOVING AROUND A CIRCLE INTERNAL MASS

Volgograd State Technical University

The method of controlling a robot with an internal mass moving in a circle around the vertical axis of the robot is considered. During the movement, one of the supports is in stationary contact with the surface, while the others are in the phase of free movement relative to the support surface. This allows the robot to rotate around a fixed support.

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

© Бордюгов Д. В., Брискин Е. С., Шаронов Н. Г., 2023.

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

Введение

Известны мобильные роботы и транспортные средства с различными типами движителей: колесными [1, 2], гусеничными [1], шагающими [1, 3] и др. Роботы с шагающими движителями отличаются от других дискретным взаимодействием с опорной поверхностью, поэтому их можно рассматривать как механические системы, на которые накладываются связи (при взаимодействии движителей с опорной поверхностью), или же связи снимаются при переносе движителя в новое положение. Роботы, перемещающиеся за счет движения внутренних масс [4, 5, 6], также можно рассматривать как механические системы с голономными связями, но с управляемыми величинами реакций этих связей, зависящих от положения масс.

Наиболее показательное явление управления величинами реакций связей проявляется при исследовании движения роботов, перемещающихся за счет периодического заклинивания одного из движителей [7, 8]. Причем это заклинивание происходит или за счет изменения положения внутренней массы (рис. 1), или за счет изменения положения одного из движителей относительно опорной поверхности (рис. 2).

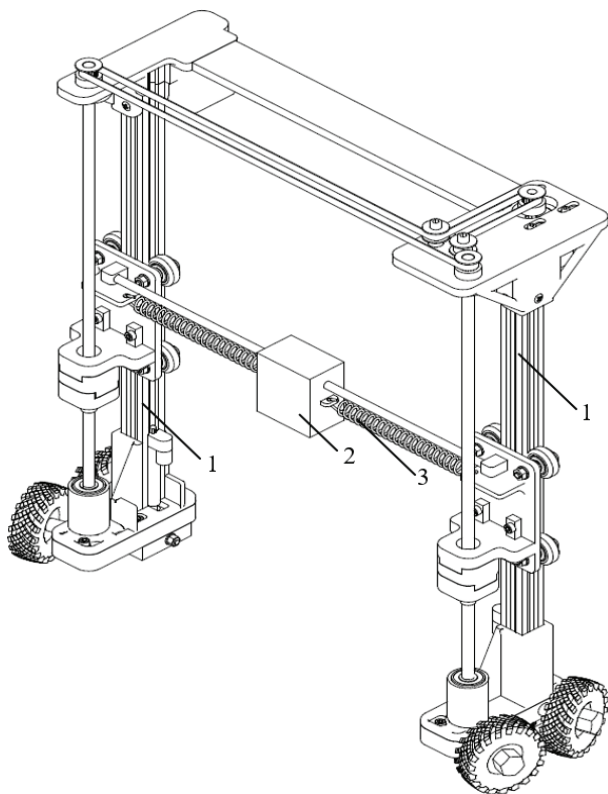


Рис. 1. Модель робота, перемещающегося за счет движения внутренней массы:
1 – опора; 2 – подвижная внутренняя масса; 3 – пружина

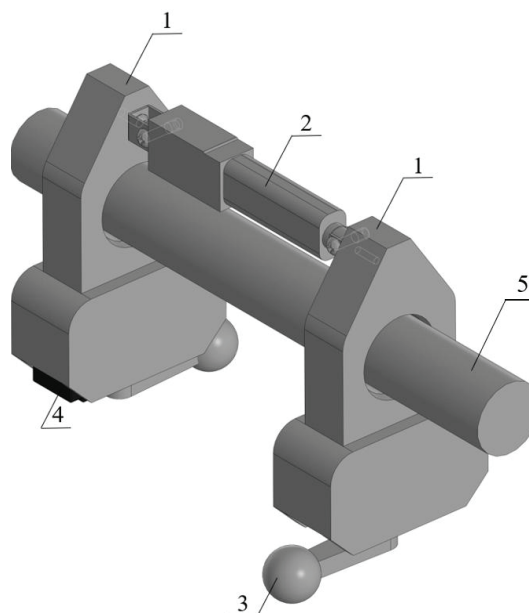


Рис. 2. Модель мобильного робота, движущегося по стержню:
1 – втулка; 2 – линейный привод; 3 – дополнительный груз;
4 – сервопривод; 5 – стержень

В первом случае траектория движения центра масс может быть различной, в зависимости от массово-геометрических параметров рассматриваемого робота; во втором – мобильный робот движется вдоль произвольно ориентированной в пространстве направляющей.

Развитие методов организации управляемого движения роботов возможно за счет объединения метода, основанного на движении внутренних масс и дискретного взаимодействия движителей с опорной поверхностью.

Кинематическая схема мобильного робота с вращающейся внутренней массой и описание его принципа движения

Рассматриваемый робот состоит из одного твердого тела, опирающегося на поверхность N

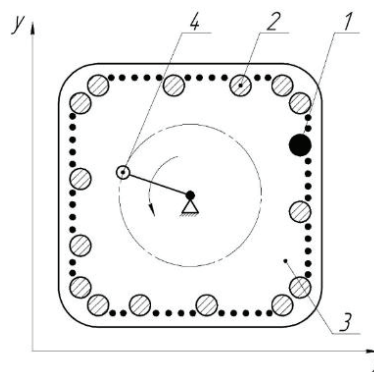


Рис. 3. Схема робота с внутренней массой, совершающей вращательное движение:
1 – заторможенная опора; 2 – свободная опора;
3 – корпус робота; 4 – неуравновешенное твердое тело, вращающееся вокруг вертикальной оси

опорами (например, шариковые опоры) и имеет внутреннее тело, совершающее вращательное движение вокруг вертикальной оси (рис. 3). В каждый момент времени одна из опор заторможена, что позволяет роботу совершать вращательное движение вокруг вертикальной оси, проходящей через нее.

Постановка задачи

Ставятся задачи: составление дифференциальных уравнений плоского движения робота с рассматриваемой кинематической схемой; определение уравнений движения рассматриваемого

робота при произвольном последовательном торможении одной из опор.

Математическое моделирование

Расчетная схема робота, перемещающегося за счет вращательного движения внутреннего тела, представлена на рис. 4.

Количество управляемых опор равно 4, установлены они симметрично.

Так как рассматривается установившийся режим движения внутренней массы, $\omega = \text{const}$, момент, развиваемый двигателем, минимален и не учитывается.

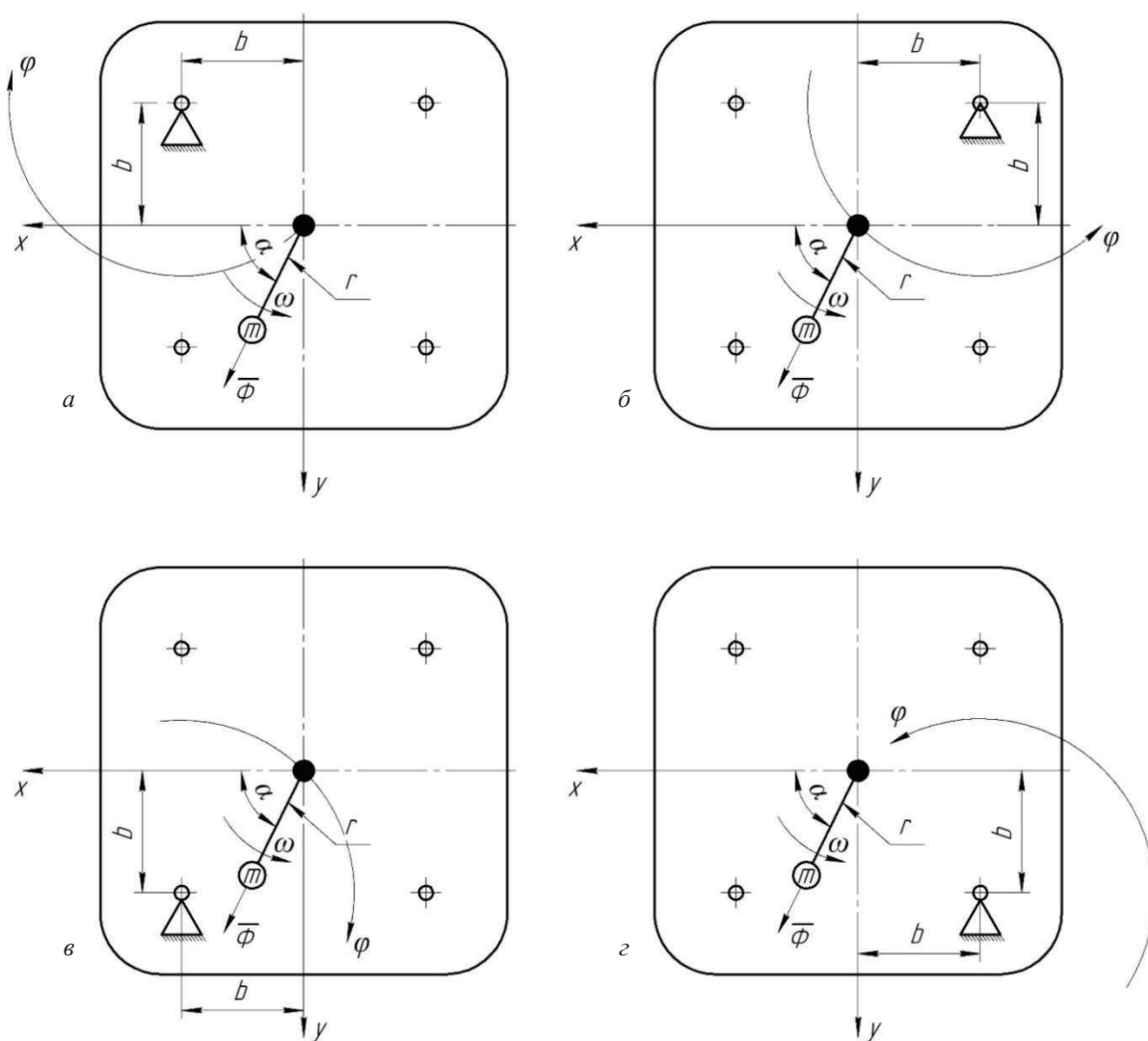


Рис. 4. Расчетная схема мобильного робота с внутренней массой, совершающей движение по окружности: а – первая опора неподвижна; б – вторая опора неподвижна; в – третья опора неподвижна; г – четвертая опора неподвижна

Обозначения на рис. 4: Φ – сила инерции; m – масса груза; r – длина стержня, на котором закреплен груз; b – расстояние от зафиксированной опоры до линии, проходящей через

центр робота; α – угол отклонения стержня относительно горизонтальной оси; ω – угловая скорость стержня с закрепленным на нем грузом; ϕ – угол поворота корпуса;

Уравнение движения корпуса робота, в предположении малости сил инерции, обусловленных

непосредственно вращательным движением робота относительно неподвижной опоры:

$$\begin{aligned} J_a \ddot{\varphi} &= M_a, \\ J_a \dot{\varphi} &= \Phi_x b + \Phi_y b, \\ J_a \ddot{\varphi} &= m r \omega^2 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega t) \cdot b + m r \omega^2 \cdot \sin(\alpha_0 + \omega t) \cdot b, \end{aligned} \quad (1)$$

где J_a – момент инерции корпуса робота; M_a – момент силы Φ , действующий со стороны вращающегося груза относительно неподвижной опоры; α_0 – начальный угол отклонения стержня относительно горизонтальной оси; $\ddot{\varphi}$ – угловое ускорение корпуса робота.

Имитационное моделирование

Для изучения характерных особенностей движения робота рассматривалась лабораторная модель с параметрами: $\alpha_0 = 1,0472$ рад; $\omega = 0,5$ рад/с; $b = 0,5$ м; $r = 0,3$ м; $J_a = 0,735$ кг·м³; $m = 2$ кг.

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

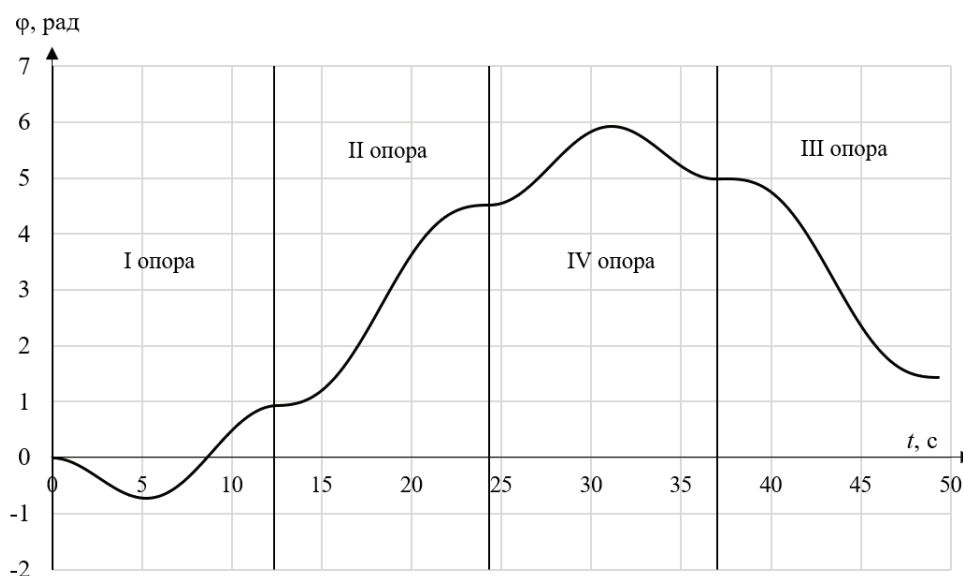


Рис. 5. Зависимость изменения угла поворота корпуса мобильного робота φ от времени t

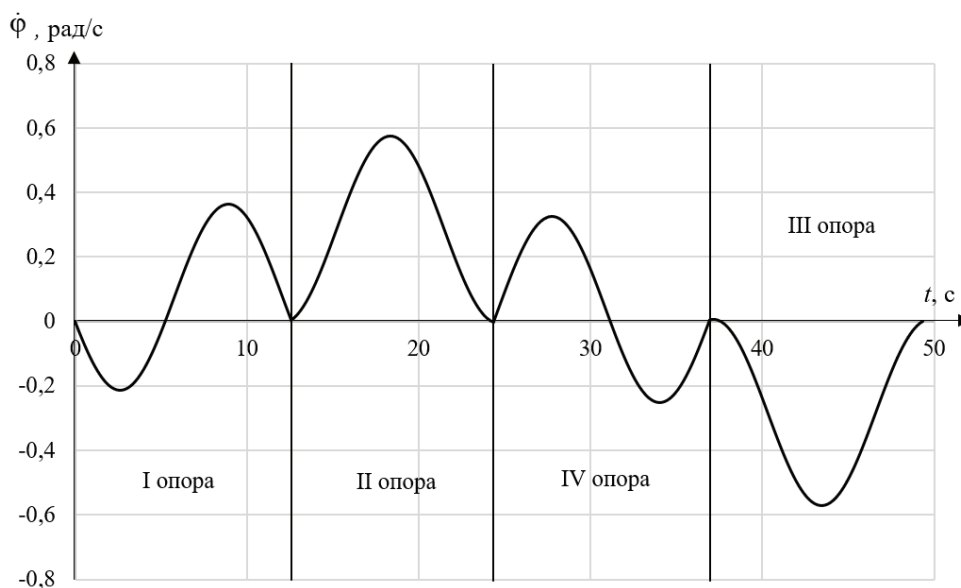


Рис. 6. Зависимость изменения угловой скорости корпуса мобильного робота $\dot{\varphi}$ от времени t

На рис. 5, 6 представлен следующий алгоритм движения мобильного робота с внутренним вращающимся двигателем при условии смены опор в момент остановки корпуса робота ($\dot{\phi} = 0$):

Алгоритм управления движением мобильного робота

Промежуток времени движения t , с	Угол поворота внутренней массы α , град	Опора, взаимодействующая с поверхностью
$0 < t \leq 12,53$ с	$0 \dots 418,94$	I опора
$12,53 < t \leq 24,35$ с	$418,94 \dots 757,50$	II опора
$24,35 < t \leq 36,95$ с	$757,50 \dots 1118,54$	IV опора
$36,95 < t \leq 49,33$ с	$1118,54 \dots 757,50$	III опора

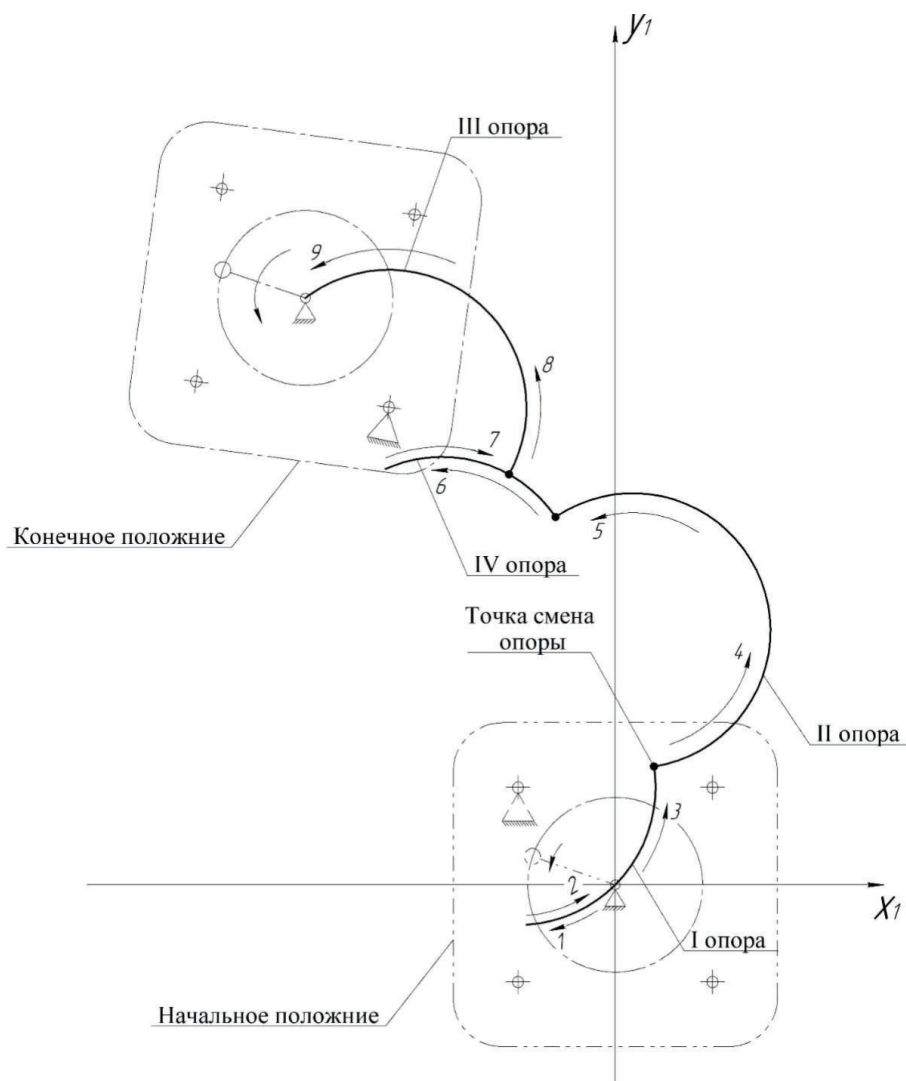


Рис. 7. Изменение положения центра корпуса мобильного робота

На рис. 7 представлена траектория изменения положения центра корпуса мобильного робота; подробнее рассмотрим участок движения 1–5. В начальный момент времени корпус начинает вращение по часовой стрелке 1, через определенное время происходит его торможе-

ние (рис. 6), после чего корпус начинает движение против часовой стрелки 2, 3. В момент времени $t = 12,53$ с (см. таблицу выше) угловая скорость корпуса робота $\dot{\phi} = 0$, и происходит смена неподвижной опоры, вокруг которой совершается вращательное движение корпуса.

На отрезке 4–5 видно, что направление вращения не изменилось. Дальнейшее перемещение мобильного робота происходит аналогичным образом.

Заключение

Рассмотренный метод управления роботом с внутренней массой, совершающей движение по окружности вокруг неподвижной оси опоры робота с постоянной угловой скоростью и опорами робота, находящимися в заторможенном или свободном состоянии, позволяет осуществлять различное по виду и характеру движение робота.

Возможна постановка задачи о выборе такого алгоритма управления последовательного торможения опор, который обеспечивает наперед заданное перемещение мобильного робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1 (1). – С. 6–14.

2. *Lozano-Perez, T.* Autonomous robot vehicles / T. Lozano-Perez // Springer Science & Business Media, 2012. – 460 p.

3. 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. – Changchun, 2009. – Pp. 363–366.

4. Черноусько, Ф. Л. О движении тела, содержащего подвижную внутреннюю массу / Ф. Л. Черноусько // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 405. – № 1. – С. 56–60.

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

6. Черноусько, Ф. Л. Анализ и оптимизация движения тела, управляемого посредством подвижной внутренней массы / Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и механика. – 2006. – Т. 70. – № 6. – С. 819–842.

7. Бордюгов, Д. В. Об управлении движением мобильного робота с движителями, работающими на эффекте периодического заклинивания / Д. В. Бордюгов, Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 23–28.

8. *Bordyugov, D. V.* The research of a movement dynamics two-legged robot with spring-loaded weight / Д. В. Бордюгов, Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1129: International Conference of Young Scientists and Students «Topical Problems of Mechanical Engineering» (ТоРМЕ-2020). – 2021. – 7 p.

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-26-30

В. В. Жога, А. В. Нелюбова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММНЫХ ТРАЕКТОРИЙ*

Волгоградский государственный технический университет

mqdschen@yandex.ru

Рассматриваются условия управляемости манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной геометрической связью. Устанавливается связь между скоростями исполнительных приводов и кинематическими параметрами программных траекторий. Определяются особые положения механизма манипулятора.

Ключевые слова: манипулятор параллельно-последовательной структуры, программная траектория, управляющая матрица.

V. V. Zhoga, A. V. Nelyubova

DETERMINATION OF KINEMATIC PARAMETERS OF ACTUATORS FOR THE IMPLEMENTATION OF PROGRAM TRAJECTORIES

Volgograd State Technical University

The conditions of controllability of a manipulator of a parallel-sequential structure with an additional geometric connection are considered. A connection is established between the speeds of the actuators and the kinematic parameters of the program trajectories. The special positions of the manipulator mechanism are determined.

Keywords: manipulator of parallel-sequential structure, program trajectory, control matrix.

© Жога В. В., Нелюбова А. В., 2023.

* Исследование выполнено за счет проекта, осуществляемого магистрантами ВолгГТУ по программе развития ВолгГТУ «Приоритет 2030» № 25/480-22.

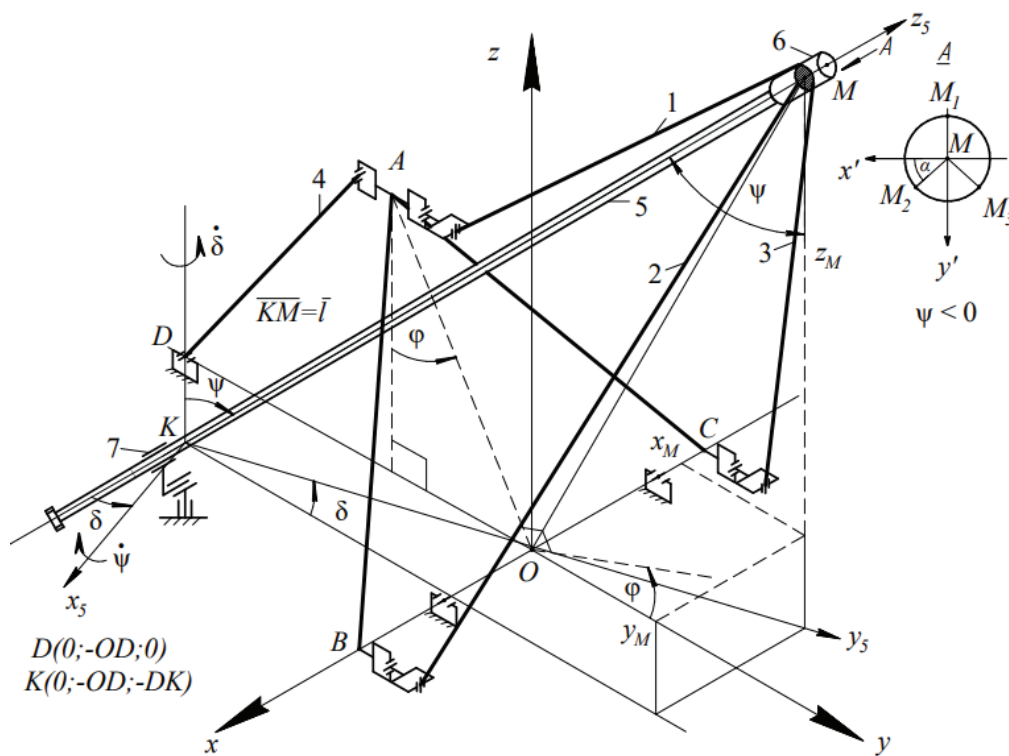
Введение

В настоящее время в развитии роботизированного производства большую роль играют манипуляторы параллельно-последовательной структуры, состоящие из механизмов последовательной и параллельной кинематических схем. Одним из существующих разновидностей манипуляторов параллельно-последовательной структуры является манипулятор-трипод на поворотном основании [1]. Однако нагрузка на рабочем органе приводит к возникновению изгибающих моментов на линейные приводы. В результате возникает возможность их заклинивания. Для исключения заклинивания линейных приводов разработана кинематическая схема манипулятора-трипода с дополнительной геометрической связью [2, 3]. Манипуляторы с такой кинематической схемой находят применение в машиностроении при механической обработке деталей сложной геометрии; в приборостроении; при упаковке продукции и др. В качестве рабочего органа возможна установка сверла, фрезы, захватного устройства и других приспособлений, используемых при выполнении технологических операций. В процессе выполнения технологической операции рабочий орган необходимо перемещать по различным траекториям. Недостатком таких сис-

тем является увеличение числа звеньев и, следовательно, дополнительные трудности в управлении точностью перемещения исполнительного оборудования по программным траекториям. Поэтому разработка аналитических методов синтеза необходимых параметров ориентирующих перемещений исполнительных звеньев, обеспечивающих выполнение технологических операций, является актуальной задачей.

Объект исследования

Рассматривается манипулятор-трипод [4], конструкция которого состоит из трех линейных исполнительных звеньев 1, 2, 3, одни концы которых с помощью двухподвижных шарниров установлены на основании ABC в форме равнобедренного треугольника, а другие – закреплены с помощью сферических шарниров на выходном звене 6 полой трубы 5 (см. рисунок ниже). Труба может свободно перемещаться вдоль оси втулки 7, но не может совершать поворот вокруг ее оси. Центральная полая труба 5 обеспечивает жесткость конструкции и принимает на себя изгибающие моменты от внешних нагрузок, возникающих при работе манипулятора. Четвертый линейный привод 4 обеспечивает поворот основания ABC, увеличивая рабочую зону манипулятора.



Кинематическая схема манипулятора-трипода с дополнительной связью

Манипулятор имеет четыре степени подвижности [4], и его конфигурацию можно описать 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 углом $q_4 = \varphi$ наклона основания манипулятора. $OA, OB = OC, OD, DK$ – геометрические пара-

метры основания манипулятора и точек крепления на поворотном основании (см. рисунок). Уравнения программных траекторий при таком выборе обобщенных координат манипулятора удобно задавать в сферической системе координат $KM(t), \delta(t), \psi(t)$.

Уравнения, связывающие обобщенные координаты и длины исполнительных звеньев $l_k(t), k = 1 \div 4$ имеют вид [4]:

$$l_1^2 = KM^2 + r^2 + OA^2 + OD^2 + DK^2 + 2OA(DK \cos \varphi - OD \sin \varphi) - 2OA \cdot KM \sin \varphi \sin \psi \cos \delta - 2OA \cdot r \sin \varphi \cos \psi \cos \delta + 2OD \cdot KM \sin \psi \cos \delta + 2OD \cdot r \cos \psi \cos \delta + 2OA \cdot r \cos \varphi \sin \psi - 2DK \cdot KM \cos \psi + 2DK \cdot r \sin \psi, \quad (1)$$

$$l_2^2 = OB^2 + OD^2 + DK^2 + KM^2 + r^2 + 2 \cdot (OB \sin \delta - OD \cos \delta) \cdot (r \sin \alpha \cos \psi - KM \sin \psi) - 2r \cos \alpha (OB \cos \delta + OD \sin \delta) - 2DK (KM \cos \psi + r \sin \alpha \sin \psi), \quad (2)$$

$$l_3^2 = OC^2 + OD^2 + DK^2 + KM^2 + r^2 + 2(OC \sin \delta + OD \cos \delta) \cdot (KM \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi) + 2r \cos \alpha (OD \cdot \sin \delta - OC \cos \delta) - 2DK (KM \cos \psi + r \sin \alpha \sin \psi), \quad (3)$$

$$l_4^2(t) = (OD - OA \sin \varphi)^2 + OA^2 \cos^2 \varphi. \quad (4)$$

Постановка задачи

Условием управляемости исполнительных приводов, в случае манипулятора параллельно-последовательной структуры, можно называть наличие взаимно однозначного соответствия между их перемещениями и перемещениями рабочего органа. Ставится задача определения аналитических зависимостей между кинематическими параметрами программных перемещений рабочего органа и перемещениями исполнительных приводов.

Метод решения и результаты

Связь между вектором скоростей исполнительных управляющих звеньев и вектором скоростей изменения длины отрезка KM , его угловых скоростей и угловой скоростью поворотного основания, имеет вид [5]:

$$V_l = I(KM, \psi, \delta, \varphi) \cdot V_q, \quad (5)$$

где $V_l = |\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4|^T$ – вектор скоростей исполнительных линейных звеньев манипулятора;

$V_q = |KM \dot{\psi}, \dot{\delta}, \dot{\varphi}|^T$ – вектор скоростей изменения длины отрезка KM , обобщенных угловых скоростей и угловой скорости поворотного основания.

Функциональная матрица Якоби 4×4 $I(KM, \psi, \delta, \varphi)$ состоит из частных производных

$$\zeta_{ij} = \frac{\partial l_i}{\partial q_j}, \quad (i, j = 1 \div 4). \quad (6)$$

Эту матрицу принято называть управляющей [6]. Обращение определителя матрицы Якоби в нуль является признаком особого положения механизма. Неравенство определителя нулю является необходимым и достаточным условием существования и единственности решения уравнения (5), то есть обеспечения однозначного соответствия между задаваемыми программными скоростями обобщенных координат и скоростями исполнительных звеньев.

Элементы матрицы определяем по формулам (6) с учетом (1)–(5):

$$\zeta_{11} = \frac{\partial l_1}{\partial KM} = \frac{KM + OD \cdot \sin \psi \cos \delta - OA \cdot \sin \varphi \sin \psi \cos \delta - DK \cdot \cos \psi}{l_1}, \quad (7)$$

$$\zeta_{12} = \frac{\partial l_1}{\partial \psi} = \frac{-OA \cdot KM \sin \varphi \cos \psi \cos \delta + OAr \sin \varphi \sin \psi \cos \delta + OD \cdot KM \cos \psi \cos \delta}{l_1} + \frac{-ODr \sin \psi \cos \delta + OAr \cos \varphi \cos \psi + DK \cdot KM \sin \psi + DKr \cos \psi}{l_1}, \quad (8)$$

$$\zeta_{13} = \frac{\partial l_1}{\partial \delta} = \frac{OA \cdot KM \sin \varphi \sin \psi \sin \delta + OAr \sin \varphi \cos \psi \sin \delta - OD \cdot KM \sin \psi \sin \delta - ODr \cos \psi \sin \delta}{l_1}, \quad (9)$$

$$\zeta_{14} = \frac{\partial l_1}{\partial \varphi} = OA \cdot \frac{-(DK \sin \varphi + OD \cos \varphi) - KM \cos \varphi \sin \psi \cos \delta - r \cos \varphi \cos \psi \cos \delta}{l_1} - \frac{OA \cdot r \sin \varphi \sin \psi}{l_1}, \quad (10)$$

$$\zeta_{21} = \frac{\partial l_2}{\partial KM} = \frac{KM - (OB \sin \delta - OD \cos \delta) \sin \psi - DK \cos \psi}{l_2}, \quad (11)$$

$$\zeta_{22} = \frac{\partial l_2}{\partial \psi} = \frac{-(OB \sin \delta - OD \cos \delta) \cdot (r \sin \alpha \sin \psi + KM \cos \psi) + DK(KM \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi)}{l_2}, \quad (12)$$

$$\zeta_{23} = \frac{\partial l_2}{\partial \delta} = \frac{(OB \cos \delta + OD \sin \delta) \cdot (r \sin \alpha \cos \psi - KM \sin \psi) + r \cos \alpha (OB \sin \delta - OD \cos \delta)}{l_2}, \quad (13)$$

$$\zeta_{31} = \frac{\partial l_3}{\partial KM} = \frac{KM + (OC \sin \delta + OD \cos \delta) \sin \psi - DK \cos \psi}{l_3}, \quad (14)$$

$$\zeta_{32} = \frac{\partial l_3}{\partial \psi} = \frac{(OC \sin \delta + OD \cos \delta) \cdot (KM \cos \psi + r \sin \alpha \sin \psi) + DK(KM \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi)}{l_3}, \quad (15)$$

$$\zeta_{33} = \frac{\partial l_3}{\partial \delta} = \frac{(OC \cos \delta - OD \sin \delta) \cdot (KM \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi) + r \cos \alpha (OD \cdot \cos \delta + OC \sin \delta)}{l_3}, \quad (16)$$

$$\zeta_{24} = \frac{\partial l_2}{\partial \varphi} = 0, \quad \zeta_{34} = \frac{\partial l_3}{\partial \varphi} = 0, \quad \zeta_{41} = \frac{\partial l_4}{\partial KM} = 0, \quad (17)$$

$$\zeta_{42} = \frac{\partial l_4}{\partial \psi} = 0, \quad \zeta_{43} = \frac{\partial l_4}{\partial \delta} = 0, \quad \zeta_{44} = \frac{\partial l_4}{\partial \varphi} = \frac{-OD \cdot OA \cos \varphi}{l_4},$$

Приравнивая определитель матрицы Якоби к нулю, найдем особые точки механизма манипулятора:

$$\Delta_I = \begin{vmatrix} \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} & \zeta_{14} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} & 0 \\ \zeta_{31} & \zeta_{32} & \zeta_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \zeta_{44} \end{vmatrix} = \zeta_{44} \begin{vmatrix} \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} \\ \zeta_{31} & \zeta_{32} & \zeta_{33} \end{vmatrix} = 0. \quad (18)$$

Из (18), в частности, следует что $\Delta_I = 0$ при $\varphi = \pi/2$. Это означает, что четвертый исполнительный цилиндр (см. рисунок выше) находится в мертвом положении. При выборе значений

конструктивных параметров основания это условие необходимо учитывать. Подставляя в (18) выражения (7)–(17), получаем уравнение, связывающее геометрические параметры манипулятора с обобщенными координатами:

$$\begin{aligned} & (KM + OD \cdot \sin \psi \cos \delta - OA \cdot \sin \varphi \sin \psi \cos \delta - DK \cdot \cos \psi) \times \\ & \times [OD \cdot (r \sin \alpha \sin \psi + KM \cos \psi) + DK (KM \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi)] - \\ & - (KM + OD \sin \psi - DK \cos \psi) \times \\ & \times \begin{bmatrix} -OA \cdot KM \sin \varphi \cos \psi + OAr \sin \varphi \sin \psi + OD \cdot KM \cos \psi - \\ -ODr \sin \psi + OAr \cos \varphi \cos \psi + DK \cdot KM \sin \psi + DKr \cos \psi \end{bmatrix} = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Близость выражения (19) к нулю означает резкий рост программных усилий исполнительных звеньев. Аналитические исследования показали, что значение угла δ не влияет на наличие особых положений.

Выражения (6) элементов матрицы Якоби являются аналогами линейных скоростей исполнительных звеньев. Например, выражение для скорости второго исполнительного звена имеет вид:

$$\dot{i}_2 = \zeta_{21} \dot{KM} + \zeta_{22} \dot{\psi} + \zeta_{23} \dot{\delta}, \quad \zeta_{24} = 0.$$

Тогда, зная выражения для программной траектории $KM(t)$, $\delta(t)$, $\psi(t)$ в сферической системе координат, легко определить требуемый закон изменения скорости привода этого звена.

Заключение

Получены аналитические выражения управляющей матрицы, связывающей скорости исполнительных звеньев с программными скоростями обобщенных координат манипулятора. Близость механизма к особым положениям требует сравнения необходимых затрат механической энергии исполнительных приводов с допустимыми параметрами приводов исполнительных звеньев манипулятора. Наличие аналитического выражения для управляющей матрицы позволяет учитывать взаимное влия-

ние приводов на перемещение рабочего органа манипулятора и определять особые положения механизма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. П. м. № 218886 У1 Российская Федерация, МПК В66С 23/00. Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет». – 2023.
3. П. м. № 218887 У1 Российская Федерация, МПК В66С 23/44. Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет». – 2023.
4. 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.
5. О неустойчивых режимах работы электропривода манипулятора / И. А. Несмиянов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 3. – С. 18–25.
6. Механика промышленных роботов. В 3 кн.: учеб. пособие для втузов / под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. Кн. 2: Расчет и проектирование механизмов. – М.: Высш. шк., 1988. – 367 с.

УДК 621.865.8
DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-31-33

В. В. Жога, Н. Г. Шаронов, И. П. Вершинина
ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДВОДНОГО РОБОТА
С МАНИПУЛЯТОРАМИ*

Волгоградский государственный технический университет
viczhoga@gmail.com

Моделируется движение необитаемого подводного аппарата (НПА) с манипуляторами, закрепленными на его корпусе. Предлагаемая математическая модель предназначена для синтеза алгоритмов системы управления технологическими операциями в режиме динамического позиционирования и отслеживания программных траекторий рабочего органа.

Ключевые слова: манипулятор, квазикоординаты, уравнения Эйлера – Лагранжа, динамическое позиционирование, программные траектории.

V. V. Zhoga, N. G. Sharonov, I. P. Vershinina
DYNAMIC MOTION MODEL OF AN UNDERWATER ROBOT
WITH MANIPULATORS

Volgograd State Technical University

The motion of an uninhabited underwater vehicle (NPA) with manipulators mounted on its body is simulated. The proposed mathematical model is designed to synthesize algorithms for the control system of technological operations in the mode of dynamic positioning and tracking of program trajectories of the working body.

Keywords: manipulator, quasi-coordinates, equations Euler – Lagrange, dynamic positioning, program trajectories.

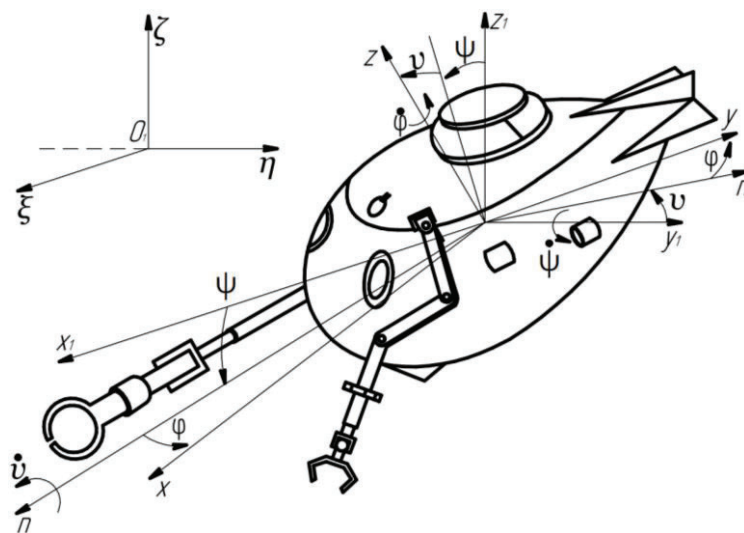
Введение

Для выполнения технологических операций на подводные роботы устанавливаются многозвенные манипуляторы [1, 2]. С их помощью решаются задачи мониторинга морского дна, взятие биологических проб и обслуживание подводных сооружений, включая трубопроводы. Также подводные роботы широко используются при проведении поисково-спасательных работ, при изучении подводной флоры и фауны, для инспекции судов и в других случаях

[3, 4]. Применение подводных манипуляторов избавляет человека от опасного труда и, в то же время, сокращает эксплуатационные расходы, делая возможным проведение широкого спектра операций, недоступных человеку.

Расчетная схема

Механическая часть НПА представляется в виде твердого тела (корпуса) и связанных с ним многозвенных механизмов манипуляционных роботов (см. рисунок ниже).



Расчетная схема необитаемого подводного аппарата

© Жога В. В., Шаронов Н. Г., Вершинина И. П., 2023.

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

Движение корпуса НПА рассматривается относительно неподвижной системы отсчета $O_1\xi_1\eta_1\zeta_1$ и определяется вектором скорости \vec{V}_0 центра масс корпуса и вектором его угловой скорости $\vec{\omega}$. С корпусом аппарата жестко связана система координат $Oxyz$, оси которой являются главными центральными осями инерции. Конфигурация манипуляторов относительно этой системы координат описывается обобщенными координатами q_{si} ($i=1,2,\dots,k$ – количество манипуляторов; $s=1,2,\dots,n_k$ – число степеней свободы k -го манипулятора). Положение системы координат $Oxyz$ задается с помощью корабельных углов Эйлера $\psi(t), \varphi(t), \nu(t)$ относительно системы координат

$Ox_1y_1z_1$, перемещающейся поступательно относительно неподвижной системы $O_1\xi_1\eta_1\zeta_1$. С каждым звеном манипуляторов связаны подвижные системы координат $C_{si}x_{si}y_{si}z_{si}$, оси которых являются главными центральными осями инерции.

Уравнения движения корпуса

Уравнения движения центра масс системы «корпус – манипуляторы» составляется в форме уравнений Эйлера – Лагранжа [5] относительно квазискоростей $V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекций векторов $\vec{V}_0, \vec{\omega}$ на оси подвижной системы координат $Oxyz$. В векторной форме эти уравнения имеют вид:

$$M \left[\vec{V}_0^* + \vec{\omega} \times \vec{V}_0 + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r}_c^* + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_c^*) + 2\vec{\omega} \times \vec{r}_c^{**} + \dot{\vec{r}}_c^{**} \right] = \vec{N}, \quad (1)$$

$$\left\| \Theta^o \right\| \cdot \dot{\vec{\omega}} + \left\| \Theta^o \right\| \cdot \vec{\omega} + \vec{\omega} \times \left\| \Theta^o \right\| \cdot \vec{\omega} + \vec{K}_r^o + \vec{\omega} \times \vec{K}_r^o + M\vec{r}_c^* \times \left(\vec{V}_0^* + \vec{\omega} \times \vec{V}_0 \right) = \vec{m}^o, \quad (2)$$

где M – масса корпуса и манипуляторов; $\vec{r}_c^*, \vec{r}_c^{**}$ – радиус-вектор центра масс системы относительно полюса O и его относительные производные; $\left\| \Theta^o \right\|$ – тензор инерции системы в точке O ; \vec{K}_r^o – главный момент относительных количеств движения относительно полюса O системы; \vec{N}, \vec{m}^o – главный вектор и главный момент всех активных сил относительно полюса O .

Уравнение (1) выражает теорему об изменении главного вектора количества движения системы, а уравнение (2) – теорему об изменении главного вектора момента количеств движения системы. Система уравнений (1), (2) содержит обобщенные координаты манипуляторов q_{si} и соответствующие им обобщенные скорости и обобщенные ускорения. Для полного описания движений механической системы необходимо составить уравнения движения манипуляторов.

Дифференциальные уравнения относительного движения манипуляторов

Кинетическую энергию системы можно представить в виде суммы трех слагаемых:

$$T = T_e + T_m + T_r. \quad (3)$$

В этом выражении T_e – кинетическая энергия переносного движения, равная

$$T_e = \frac{1}{2} \left[MV_0^2 + 2M\vec{V}_0 \cdot (\vec{\omega} \times \vec{r}_c^*) + \vec{\omega} \cdot \Theta^o \cdot \vec{\omega} \right]. \quad (4)$$

Величины $\Theta^o(q_{is})$ и $\vec{r}_c^*(q_{is})$ являются функциями обобщенных координат манипуляторов, а от обобщенных скоростей не зависят.

Слагаемые

$$T_m = \vec{V}_0 \cdot \vec{Q}_r + \vec{\omega} \cdot K_r^o \quad (5)$$

зависят от относительных движений звеньев манипуляторов и являются линейными функциями обобщенных скоростей \dot{q}_{is} .

Кинетическая энергия относительных движений T_r является квадратичной функцией обобщенных скоростей \dot{q}_{is} с коэффициентами, зависящими от обобщенных координат q_{si} :

$$T_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij}(q_{ij}) \cdot \dot{q}_i \dot{q}_j. \quad (6)$$

Применяя для (3) формализм Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{si}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_{si}} = Q_{si} + Q_{si}^o, \quad s=1,2,\dots,n \quad (7)$$

с учетом выражений (4), (5) и (6), получаем n дифференциальных уравнений относительных движений механизма манипулятора:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_r}{\partial \dot{q}_{si}} \right) - \frac{\partial T_r}{\partial q_{si}} = Q_{si} + Q_{si}^\Phi - M \left(\vec{V}_0^* + \vec{\omega} \times \vec{V}_0 \right) \cdot \frac{\partial \vec{r}'_c}{\partial q_{si}} + \frac{1}{2} \vec{\omega} \cdot \frac{\partial \Theta^o}{\partial q_{si}} \cdot \vec{\omega} - \dot{\vec{\omega}} \cdot \frac{\partial \vec{K}_r^o}{\partial \dot{q}_{si}} - \vec{\omega} \cdot \left[\left(\frac{\partial \vec{K}_r^o}{\partial \dot{q}_{si}} \right) - \frac{\partial \vec{K}_r^o}{\partial q_{si}} \right], \quad (8)$$

где Q_{si} – обобщенная сила активных сил, соответствующая s координате; Q_{si}^Φ – обобщенная сила сил сопротивления.

Обобщенные силы сил сопротивления в случае линейного вязкого сопротивления вычисляются через диссипативную функцию Рэлея, которая может быть записана в форме

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \mu_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j.$$

Конкретный вид левой части уравнений (8) зависит от кинематических схем манипуляторов, установленных на НПА.

Таким образом, сформирована система из $(6 + \sum n_k)$ дифференциальных уравнений относительно шести квазикоординат $V_x, V_y, V_z,$

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ и $\sum_{s=1}^{n_k} \sum_{i=1}^k q_{si}$ – обобщенных координат присоединенных манипуляторов.

Полученная система дифференциальных уравнений (1), (2), (8) позволяет решать задачу синтеза алгоритма стабилизации рабочего ор-

гана манипулятора относительно назначенного положения на основе решения обратной задачи динамики. Параметры системы управления манипуляторами и корпусом НПА определяются по уравнениям математической модели в режиме динамического позиционирования [6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бахарев, С. А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения мирового океана / С. А. Бахарев, В. В. Карасев, А. В. Карасев // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. – 2015. – С. 41–51.
2. Разработка, программная реализация и исследование системы управления многозвенными манипуляторами необитаемых подводных аппаратов при динамическом позиционировании над морскими объектами / А. Ю. Коноплин, А. П. Юрманов, Н. А. Красавин, П. А. Пятавин // Подводные исследования и робототехника. – 2021. – № 3 (37). – С. 4–15.
3. Коноплин, А. Ю. Система управления скоростью движения манипуляторов, установленных на необитаемых подводных аппаратах / А. Ю. Коноплин, Н. А. Красавин // Подводные исследования и робототехника. – 2022. – № 2(40). – С. 29–38.
4. Филаретов, В. Ф. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота / В. Ф. Филаретов, А. Ю. Коноплин, Н. Ю. Коноплин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 8. – С. 543–549.
5. Лурье, А. И. Аналитическая механика. / А. И. Лурье. – М.: Наука, Физматлит., 1961. – 824 с.
6. Динамика манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода / Н. С. Воробьева, В. В. Дяшкин-Титов, В. В. Жога, И. А. Несмиянов // Машиностроение и инженерное образование. – 2017. – № 3 (52). – С. 46–55.

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5
DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-33-40

А. В. Леонард

ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНОГО РОБОТА
С ОБХОДОМ СТАЦИОНАРНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ
НА ОСНОВЕ ПОДХОДА VC/APF+BC_τ¹

Волгоградский государственный технический университет

Alex-Leonard@yandex.ru

Рассматриваются свойства оптимального планирования движения наземного робота с обходом статичного препятствия при заданных краевых условиях (координатах, скоростях) и времени движения (BC_τ¹). Планирование движения реализуется на основе подхода VC/APF+BC_τ¹ – совместного применения вариационного исчисления (VC) и искусственного потенциального отталкивающего поля (APF).

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

A. V. Leonard

FEATURES OF MOTION PLANNING OF A GROUND ROBOT WITH BYPASSING
A STATIONARY OBSTACLE BASED ON THE VC/APF+BC_τ¹ APPROACH

Volgograd State Technical University

The article considers the properties of optimal motion planning for a ground robot with a bypass of a static obstacle for given boundary conditions (coordinates, velocities) and motion time (BC_τ¹). Motion planning is implemented on the basis of the VC/APF+BC_τ¹ approach – the joint application of the calculus of variations (VC) and the artificial potential field (APF).

Keywords: mobile robot, motion planning, calculus of variations, potential field method, optimal control

Введение

Предложенный в работах [1–3] подход VC/APF+BC_τ¹ основывается на решении вариационной задачи с граничными условиями по обходу наземным роботом на плоском основании статичного препятствия за отведенное оперативное время, без сил сопротивления. При этом перемещение робота разделяется на три режима: 1 – глобальное планирование движе-

ния (сенсоры робота не фиксируют препятствие); 2 – локальное планирование движения (сенсоры обнаруживают препятствие); 3 – глобальное планирование движения (робот преодолел препятствие). Законы движения для первого и третьего режимов определяются аналитически с помощью вариационного исчисления, исходя из интегрального критерия вида (с соответствующими краевыми условиями):

$$I = \int_0^{\tau(\tau_2)} \Phi(t, x, y, \dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}) dt, \quad \Phi = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{m\dot{y}^2}{2} + \frac{k_a \ddot{x}^2}{2} + \frac{k_a \ddot{y}^2}{2}, \quad (1)$$

где m – масса робота; x, y – координаты центра масс робота; k_a – размерный коэффициент пропорциональности; $\tau(\tau_2)$ – заданное (оставшееся) время перемещения робота. Законы

движения для второго режима (обхода препятствия) определяются в дифференциальной форме, исходя из критерия, в который входит функция поля [4, 5] (отталкивающего робота от препятствия в форме окружности радиуса R_1):

$$I = \int_0^{\tau_1} \Phi(t, x, y, \dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}) dt, \quad \Phi = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{m\dot{y}^2}{2} - \begin{cases} \frac{c}{2} \left[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - 2r_0 \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + r_0^2} \right], & r \leq r_0 \\ 0, & r > r_0 \end{cases}, \quad (2)$$

где x_1, y_1 – координаты центра препятствия в виде окружности; r_0 – радиус окружности, определяющий размер внешней границы поля; c – параметр поля (жесткость условной пружины). Значение параметра c определяется из закона сохранения энергии с учетом сохранения момента импульса относительно центра поля (при остановке центра масс робота на внутренней границе поля):

$$\frac{mV_{\parallel}^2|_{r=r_0}}{2} + \frac{mV_{\perp}^2|_{r=r_0}}{2} = \frac{mV_{\perp}^2|_{r=r_0}}{2} \frac{r_0^2}{r_{\min}^2} + \frac{c}{2} (r_{\min} - r_0)^2, \quad (3)$$

где $V_{\parallel}|_{r=r_0}$ – компонент вектора скорости центра масс робота, направленный к центру препятствия в момент его входа в поле отталкива-

ния; $V_{\perp}|_{r=r_0}$ – компонент вектора скорости центра масс робота, направленный перпендикулярно к линии, соединяющей центр масс робота и центр препятствия, в момент его входа в отталкивающее поле; r_{\min} – минимально допустимое расстояние между центром масс робота и центром препятствия в поле (размер внутренней границы поля): $r_{\min} \geq R + R_1$.

1. Влияние вектора скорости робота на обход препятствия

При определенных режимах движения оказывается, что аналитически синтезированная траектория движения робота (R) пересекает зону радиуса r_{\min} (внутреннюю границу поля),

а линия вектора скорости центра масс робота на входе в поле (r_0) проходит вне зоны r_{\min} (не пересекая ее). В этом случае значение жесткости (c) условной пружины приобретает отрицательные значения, что приводит к сближе-

нию робота с препятствием (рис. 1) и к увеличению времени нахождения робота в поле. Как следствие, возрастает вероятность непопадания робота в финальную точку за отведенное оперативное время (τ).

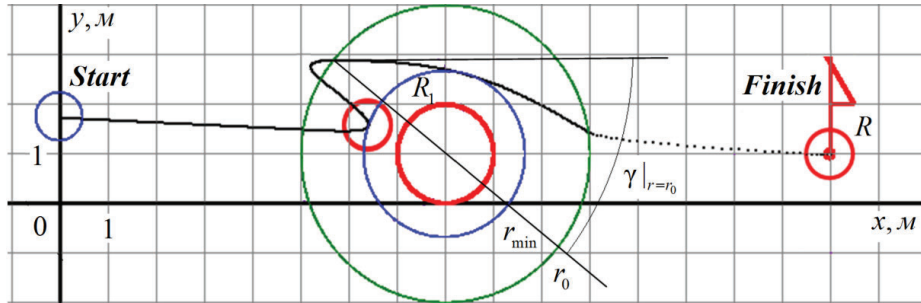


Рис. 1. Влияние вектора скорости (на входе в поле) на обход препятствия

Условие, при котором значение жесткости условной пружины приобретает отрицательное значение, может быть получено из формулы (3):

$$\sin^2 \gamma|_{r=r_0} > \frac{r_{\min}^2}{r_0^2}, \quad (4)$$

где $\gamma|_{r=r_0}$ – угол между вектором скорости робота на входе в поле и линией, проходящей через точку входа робота в поле и центр препятствия в форме окружности R_1 . Для того чтобы значения жесткости условной пружины (пара-

метра поля c) были неотрицательными, алгоритм навигации робота должен отслеживать выполнение условия

$$\sin^2 \gamma|_{r=r_0} \leq \frac{r_{\min}^2}{r_0^2} \quad (5)$$

Если условие (5) выполняется, то расчет параметра поля ведется по формуле (21) [1]. В противоположном случае необходимо назначение параметра поля, например равным нулю (рис. 2) или равным значению параметра поля при предыдущем входе в поле (рис. 3).

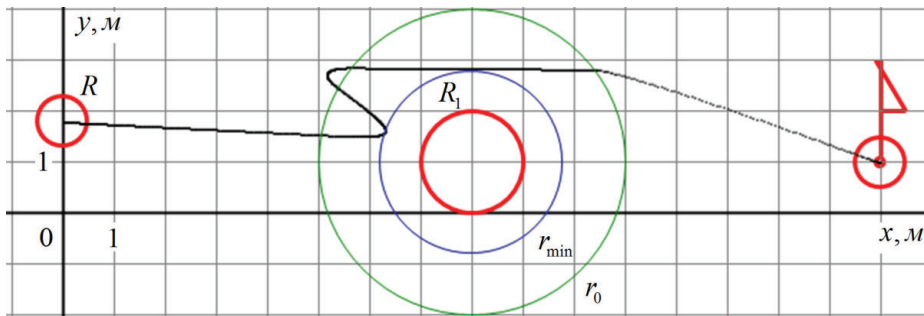


Рис. 2. Обход препятствия при нулевом значении параметра поля:

$$V_{\text{aver}} = 1,6 \text{ м/с}; V_{\text{max}} = 7,61 \text{ м/с}; a_{\text{max}} = 26,78 \text{ м/с}^2; N_{\text{max}} = 76,67 \text{ Вт}$$

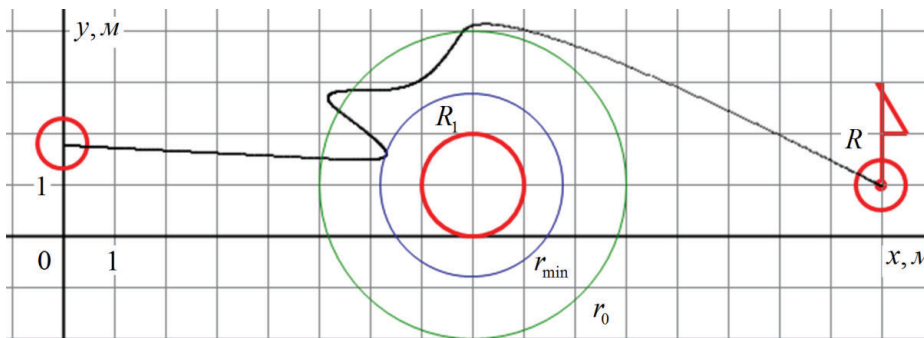


Рис. 3. Обход препятствия с ненулевым значением параметра поля:

$$V_{\text{aver}} = 1,6 \text{ м/с}; V_{\text{max}} = 5,96 \text{ м/с}; a_{\text{max}} = 12,13 \text{ м/с}^2; N_{\text{max}} = 27,17 \text{ Вт}$$

На рис. 2 и 3: V_{aver} , V_{max} – средняя и максимальная скорость робота; a_{max} – максимальное ускорение; N_{max} – максимальная потребляемая мощность.

Однако в представленном на рис. 2 случае (в сравнении с режимом движения, рис. 3) равенство нулю параметра поля приводит к кратному увеличению максимального ускорения, потребляемой силы и мощности привода. Чем дальше робот движется в поле (без «стремления» к цели), тем меньше остается времени для попадания робота в финальную точку – и тем больше максимальное ускорение у робота по выходу из поля.

2. Влияние размеров поля на обход препятствия

Для оценки влияния размеров поля на характеристики режимов обхода статического препятствия были проведены две серии численных экспериментов. Стартовое и финальное положение центра масс робота, размер робота, препятствия, внутренние границы поля, абсцисса

центра препятствия, масса робота (1 кг), коэффициент k_a (1 кг·с²), время движения (10 с), временной шаг (10 мс) фиксировались (рис. 4). Для двух значений расстояния r (0,8; 0,1) между прямой (проходящей через начальное и конечное положение центра масс робота) и центром препятствия варьировался размер поля $d = r_0 - r_{min}$; $r_{min} = \text{const}$. Скорости центра масс робота в начальной и конечной точках задавались равными нулю.

При уменьшении размера поля, для режимов движения, когда $r = 0,1$ м, наблюдается рост числа касаний центром масс робота внутренней границы поля (r_{min}) (рис. 5). С ростом размера поля (около значений 2 и 4 м), при $r = 0,1$ м, наблюдается экспоненциальный рост максимальной скорости центра масс робота (рис. 6). Аналогичным образом изменяются зависимости максимального ускорения центра масс робота и максимальной потребляемой мощности (рис. 7, 8).

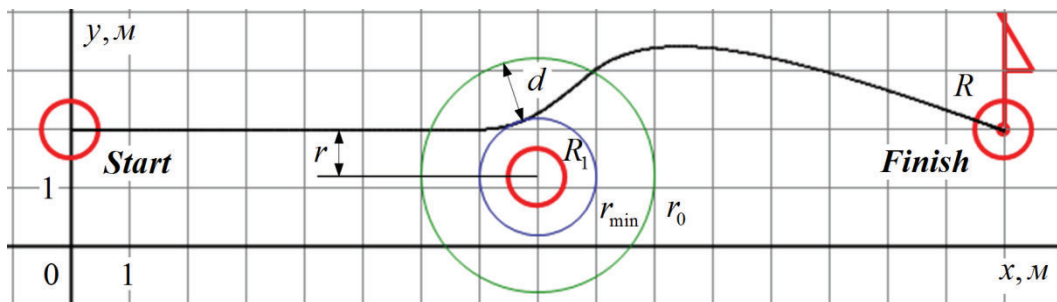


Рис. 4. Схема обхода препятствия при варьировании r_0 для двух значений r

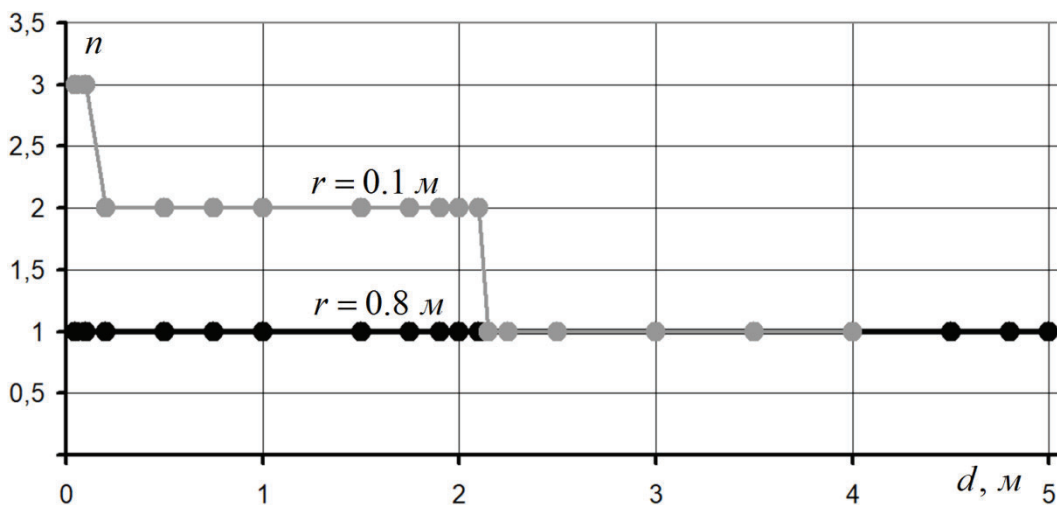


Рис. 5. Зависимость количества входов робота в поле от размера поля

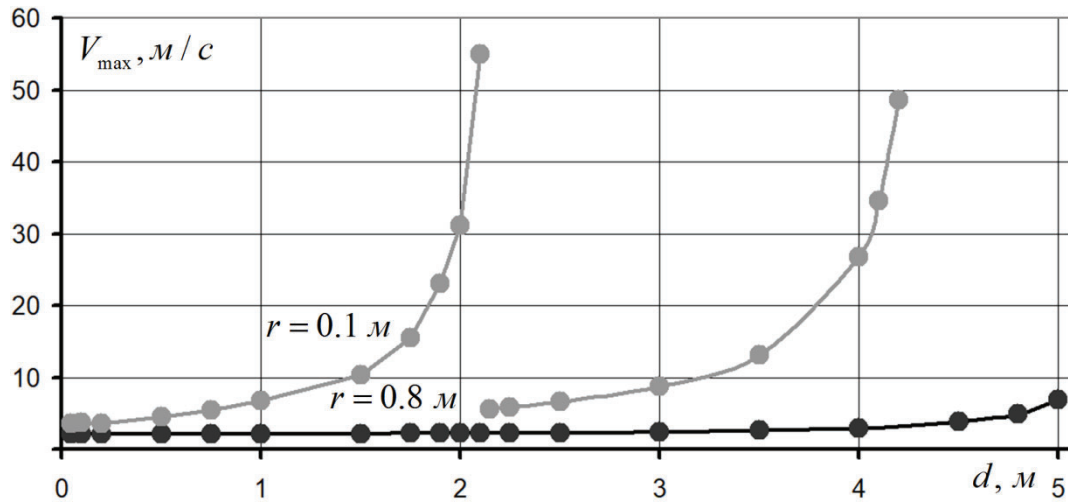


Рис. 6. Зависимость максимальной скорости робота от размера поля

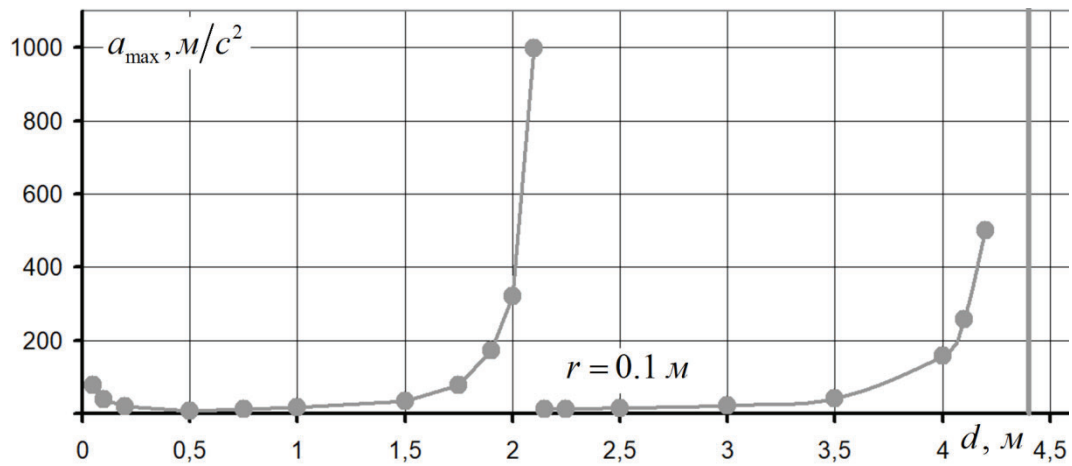


Рис. 7. Зависимость максимального ускорения от размера поля: $r = 0,1$ м

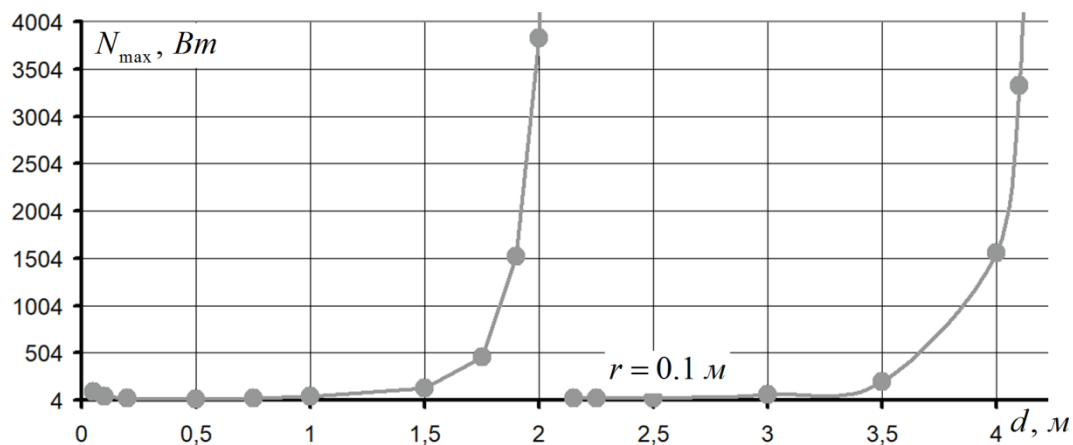


Рис. 8. Зависимость максимальной мощности от размера поля: $r = 0,1$ м

Для режимов движения $r = 0,8$ м характерно экспоненциальное изменение максимального ускорения и максимальной мощности, при $d < 0,5$ м и $d > 4$ м (рис. 9, 10).

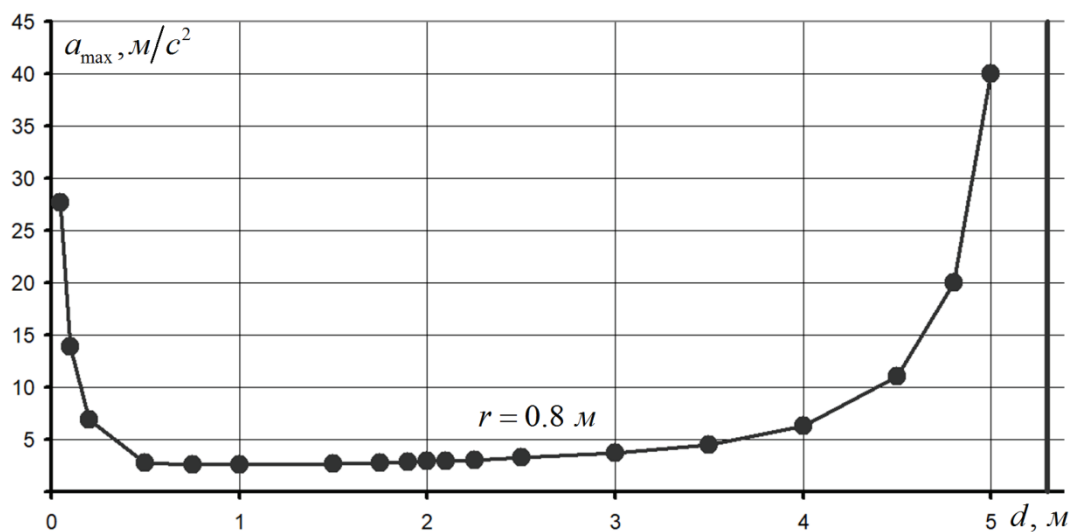


Рис. 9. Зависимость максимального ускорения от размера поля:
 $r=0,8\text{ м}$

При малом размере поля ($d < 0,5\text{ м}$) рост максимального ускорения и максимальной мощности обусловлен торможением робота с полной остановкой на внутренней границе поля. При значительном размере поля ($d > 4\text{ м}$)

большую часть времени (из отведенного) робот движется внутри поля, что с ростом размера поля вызывает рост максимального ускорения центра масс робота и максимальной мощности по выходу робота из поля.

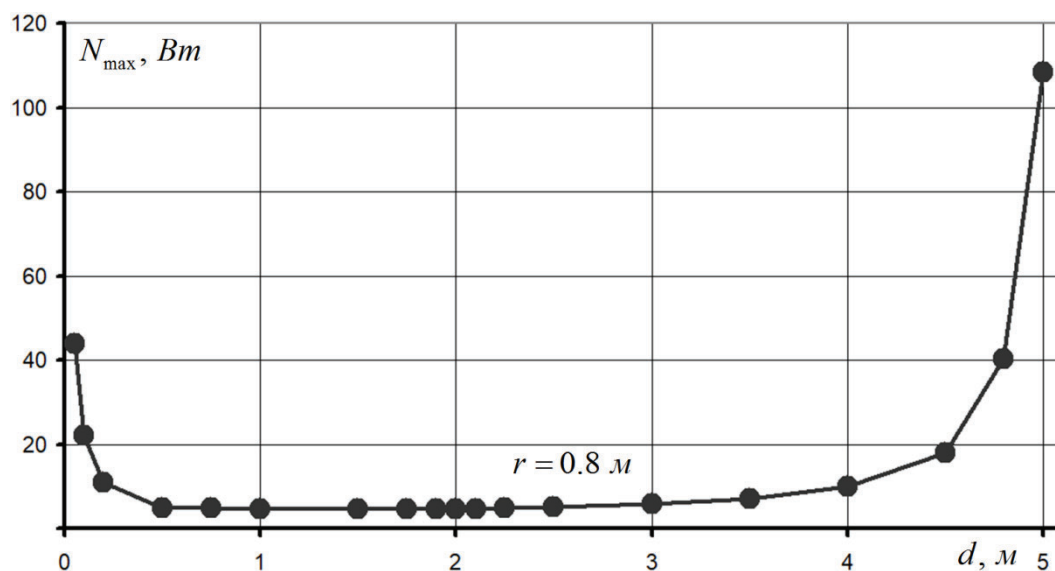


Рис. 10. Зависимость максимальной мощности от размера поля:
 $r=0,8\text{ м}$

Анализ численных экспериментов показывает, что время, затрачиваемое процессором на

выполнение алгоритма по обходу препятствия, уменьшается с ростом размера поля (рис. 11, 12).

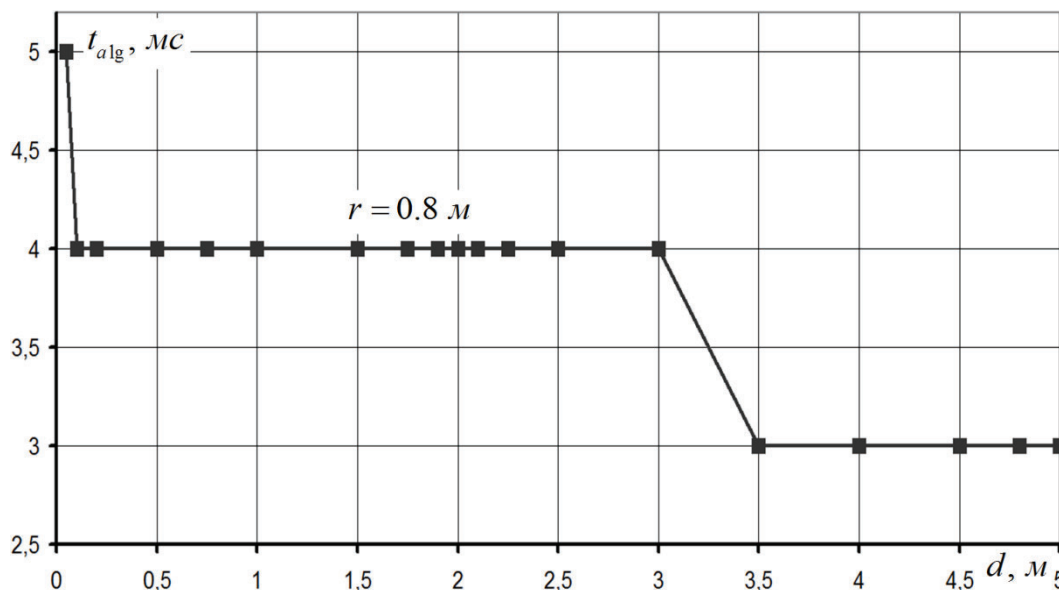


Рис. 11. Зависимость времени исполнения процессором алгоритма обхода препятствия от размера поля: $r = 0,8 \text{ м}$

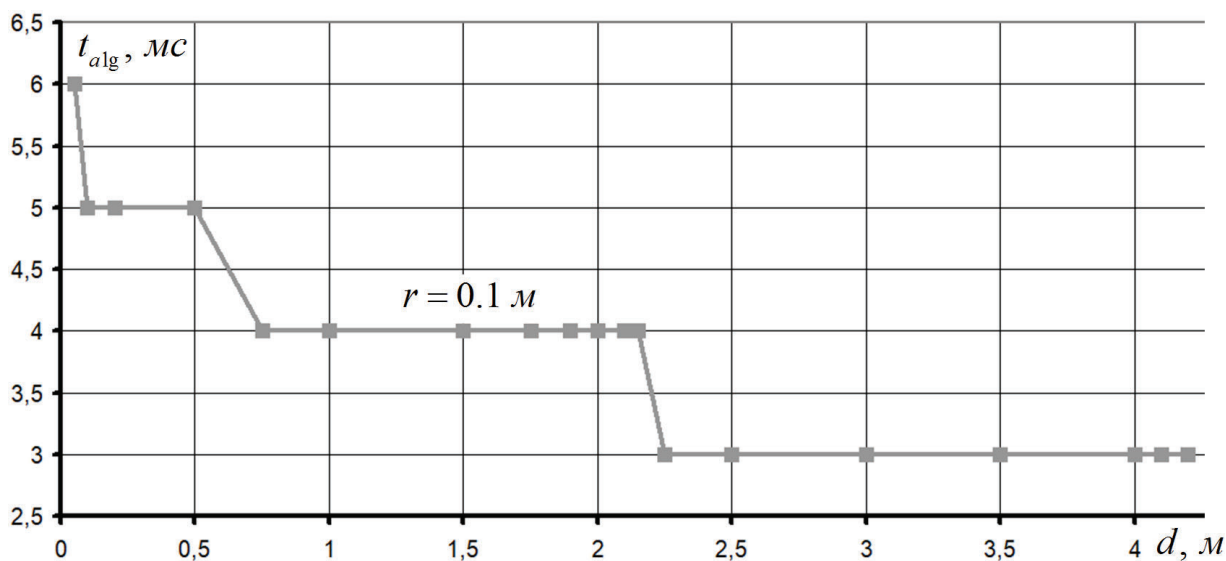


Рис. 12. Зависимость времени исполнения процессором алгоритма обхода препятствия от размера поля: $r = 0,1 \text{ м}$

Заключение

Полученное неравенство (4) определяет условие возникновения эффекта притяжения робота к препятствию. Из анализа графиков (рис. 6–10) следует, что размер поля существенным образом влияет на физическую реализуемость обхода статичного препятствия. Для реализации обхода препятствия за отведенное оперативное время при заданных краевых условиях (координатах, скоростях центра масс робота), исходя из задаваемых физических ограничений на ускорения робота и мощность привода, необ-

ходимо осуществлять подбор размера поля. Автоматический подбор размера поля (внешней границы поля) может быть реализован на основе решения соответствующей оптимизационной задачи с учетом дальности действия сенсора (2D-LIDAR) [6]. Максимальное время, затрачиваемое процессором на выполнение алгоритма по планированию обхода статичного препятствия, не превосходит 7 мс, что является приемлемым показателем для использования алгоритма в реальных системах управления мобильными роботами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени (VC/APF+BC_r¹). Ч. I. Теория // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 34–42.
2. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени (VC/APF+BC_r¹). Ч. II. Результаты / А. В. Леонард // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 42–48.
3. Планирование движения наземного робота с учетом его 2D-пространственной ориентации и обходом од-

ного статичного препятствия / А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 51–57.

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

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

6. Быков, А. С. Разработка и совместное моделирование алгоритмов обработки данных о среде, полученных 2D-LIDAR / А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 29–33.

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5
DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-40-46

А. В. Леонард

ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА С ОБХОДОМ СТАТИЧНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ВАРИАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПРИ ЗАДАННЫХ НАЧАЛЬНЫХ И КОНЕЧНЫХ КООРДИНАТАХ, СКОРОСТЯХ И ОПЕРАТИВНОМ ВРЕМЕНИ

Волгоградский государственный технический университет

Alex-Leonard@yandex.ru

Рассматривается задача оптимального планирования движения наземного робота с обходом одного статичного препятствия при заданных краевых условиях и времени движения. Предлагаемый метод планирования движения основывается на применении методов вариационного исчисления с разделением планирования движения на этапы.

Ключевые слова: мобильный робот, планирование движения, вариационное исчисление, оптимальное управление.

A. V. Leonard

ROBOT MOVEMENT PLANNING WITH BYPASSING A STATIC OBSTACLE ON THE BASIS OF SOLUTION OF THE VARIATIONAL PROBLEM FOR THE SPECIFIED INITIAL AND END COORDINATES, SPEEDS AND OPERATING TIME

Volgograd State Technical University

The article deals with the issue of developing the method for optimal planning of the movement of a ground robot with a bypass of one static obstacle for given boundary conditions and time of movement. The proposed method to traffic planning is based on the use of only the calculus of variations with the division of planning into stages.

Keywords: mobile robot, motion planning, calculus of variations, optimal control.

Введение

В отличие от существующих «классических методов APF» [1–4], в работах [5–7] представлен подход по планированию движения робота, основывающийся на совместном использовании методов вариационного исчисления и искусственного поля, отталкивающего робот от границ препятствия. При этом заданы оперативное время, начальные и конечные координаты,

скорости робота. Отталкивающее поле пространственно ограничено – имеет внешнюю и внутреннюю границы в форме окружностей. Приближение линии вектора абсолютной скорости центра масс робота к центру препятствия приводит к росту числа касаний (центром робота) внутренней границы отталкивающего от препятствия поля. Как следствие, возрастает вероятность непопадания робота в финальную

точку за отведенное оперативное время. Когда линия вектора скорости центра масс робота проходит через геометрический центр препятствия, центр масс робота совершает ряд колебательных движений и останавливается на границе поля. Размер поля существенным образом влияет на физическую реализуемость обхода статичного препятствия. В связи с этим предлагается отказаться от использования искусственного отталкивающего поля. Для этого в первом приближении ставится и решается следующая модельная задача.

1. Постановка задачи

Необходимо получить законы движения центра масс наземного робота, которые обеспечивают его перемещение из заданной начальной точки O в конечную F за отведенное время τ с обходом одного статичного препятствия (рис. 1).

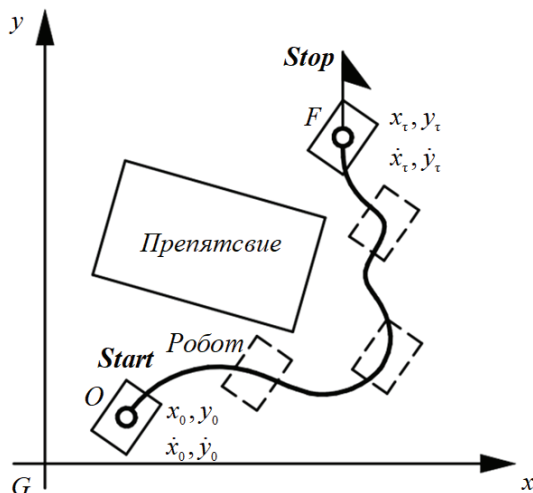


Рис. 1. Постановка задачи

При этом полагается: даны начальные и конечные координаты, скорости робота $x_0, \dot{x}_0, y_0, \dot{y}_0; x_\tau, \dot{x}_\tau, y_\tau, \dot{y}_\tau$; робот движется по плоскому горизонтальному основанию без сил сопротивления; робот обладает идеальной маневренностью – способен реализовать любую траекторию движения центра масс как угодно

быстро; система управления и сенсоры робота мгновенно считывают и обрабатывают информацию об окружающей среде на заданном расстоянии r_L . Перемещение робота можно разделить на три этапа: 1 – сенсоры робота не фиксируют препятствие (глобальное планирование); 2 – сенсоры обнаруживают препятствие, движение до препятствия (локальное планирование); 3 – движение от препятствия в конечную точку (глобальное планирование).

2. Метод решения

Так как силы сопротивления отсутствуют и робот перемещается по горизонтальному плоскому основанию, то потребные усилия привода вдоль оси абсцисс и оси ординат определяются исходя из соотношений соответственно:

$$X = m\ddot{x}, Y = m\ddot{y}. \tag{1}$$

Результирующая сила привода может быть найдена из выражения

$$F = \sqrt{m^2\ddot{x}^2 + m^2\ddot{y}^2}. \tag{2}$$

В качестве критерия оценки движения робота предлагается следующий функционал, который должен быть минимизирован:

$$I = \int_0^\tau \Phi dt \rightarrow \min, \Phi = F^2. \tag{3}$$

Таким образом, исходя из условий минимума функционала (3) – уравнений Эйлера – Пуассона

$$\frac{\partial \Phi}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{q}_i} \right) = 0, q_1 = x, q_2 = y, \tag{4}$$

законы движения центра масс робота в дифференциальной форме примут следующий вид:

$$x^{(iv)} = 0, y^{(iv)} = 0. \tag{5}$$

Для **I режима** (в отсутствии прямой видимости препятствия), с учетом заданных граничных условий: $x_0, \dot{x}_0, y_0, \dot{y}_0; x_\tau, \dot{x}_\tau, y_\tau, \dot{y}_\tau$, законы движения в интегральном виде, константы интегрирования C_{ii} и D_{ii} определяются через соотношения:

$$\begin{aligned} x_\tau &= C_{10} + C_{11}\tau + C_{12} \frac{\tau^2}{2} + C_{13} \frac{\tau^3}{6}, & y_\tau &= D_{10} + D_{11}\tau + D_{12} \frac{\tau^2}{2} + D_{13} \frac{\tau^3}{6}, & 0 \leq t \leq \tau, \\ C_{10} &= x_0, & C_{11} &= \dot{x}_0, \\ C_{12} &= 6 \frac{x_\tau - x_0}{\tau^2} - \frac{4\dot{x}_0 + 2\dot{x}_\tau}{\tau}, & C_{13} &= 6 \frac{\dot{x}_\tau + \dot{x}_0}{\tau^2} - 12 \frac{x_\tau - x_0}{\tau^3}, \\ D_{10} &= y_0, & D_{11} &= \dot{y}_0, \\ D_{12} &= 6 \frac{y_\tau - y_0}{\tau^2} - \frac{4\dot{y}_0 + 2\dot{y}_\tau}{\tau}, & D_{13} &= 6 \frac{\dot{y}_\tau + \dot{y}_0}{\tau^2} - 12 \frac{y_\tau - y_0}{\tau^3}. \end{aligned} \tag{6}$$

Для **II этапа** планирования движения характерны следующие граничные условия: $x_{II0} = x_L$, $\dot{x}_{II0} = \dot{x}_L$, $y_{II0} = y_L$, $\dot{y}_{II0} = \dot{y}_L$, $x_{II\tau^*} = x^*$, $\dot{x}_{II\tau^*} = \dot{x}^*$, $y_{II\tau^*} = y^*$, $\dot{y}_{II\tau^*} = \dot{y}^*$, где x_L , y_L , \dot{x}_L , \dot{y}_L – координаты и скорости центра масс робота в момент времени τ_1 обнаружения препятствия; x^* , y^* , \dot{x}^* , \dot{y}^* – координаты и скорости центра масс робота в момент его касания окружности радиуса $r = \alpha(R + R_1)$, $\alpha > 1$, R – радиус окружности, описывающей робот; R_1 – радиус ок-

ружности, описывающей препятствие; α – коэффициент безопасности; τ^* – промежуток времени от момента обнаружения препятствия до касания центром робота окружности радиуса r . Для второго режима функционал запишется следующим образом:

$$I_{II} = \int_0^{\tau^*} \Phi_{II} dt \rightarrow \min, \quad \Phi_{II} = m^2 \ddot{x}_{II}^2 + m^2 \ddot{y}_{II}^2. \quad (7)$$

После соответствующих преобразований законы движения для данного этапа планирования движения примут вид:

$$\begin{cases} x_{II} = x_L + \dot{x}_L t + C_{II2} \frac{t^2}{2} + C_{II3} \frac{t^3}{6}, \\ y_{II} = y_L + \dot{y}_L t + D_{II2} \frac{t^2}{2} + D_{II3} \frac{t^3}{6}, \end{cases} \quad 0 \leq t \leq \tau^*,$$

$$\begin{aligned} C_{II2} &= 6 \frac{x^* - x_L}{\tau_*^2} - \frac{4\dot{x}_L + 2\dot{x}^*}{\tau_*}, & C_{II3} &= 6 \frac{\dot{x}^* + \dot{x}_L}{\tau_*^2} - 12 \frac{x^* - x_L}{\tau_*^3}, \\ D_{II2} &= 6 \frac{y^* - y_L}{\tau_*^2} - \frac{4\dot{y}_L + 2\dot{y}^*}{\tau_*}, & D_{II3} &= 6 \frac{\dot{y}^* + \dot{y}_L}{\tau_*^2} - 12 \frac{y^* - y_L}{\tau_*^3}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для **III режима** движения робота граничные условия запишутся в виде: $x_{III0} = x^*$, $\dot{x}_{III0} = \dot{x}^*$, $y_{III0} = y^*$, $\dot{y}_{III0} = \dot{y}^*$, $x_{III\tau_2} = x_\tau$, $\dot{x}_{III\tau_2} = \dot{x}_\tau$, $y_{III\tau_2} = y_\tau$, $\dot{y}_{III\tau_2} = \dot{y}_\tau$, $\tau_2 = \tau - \tau_1 - \tau^*$.

Функционал и законы движения, характерные для данного этапа:

$$I_{III} = \int_0^{\tau - \tau_1 - \tau^*} \Phi_{III} dt \rightarrow \min, \quad \Phi_{III} = m^2 \ddot{x}_{III}^2 + m^2 \ddot{y}_{III}^2, \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_{III} = x^* + \dot{x}^* t + C_{III2} \frac{t^2}{2} + C_{III3} \frac{t^3}{6}, \\ y_{III} = y^* + \dot{y}^* t + D_{III2} \frac{t^2}{2} + D_{III3} \frac{t^3}{6}, \end{cases} \quad 0 \leq t \leq \tau - \tau_1 - \tau^*,$$

$$\begin{aligned} C_{III2} &= 6 \frac{x_\tau - x^*}{\tau_2^2} - \frac{4\dot{x}^* + 2\dot{x}_\tau}{\tau_2}, & C_{III3} &= 6 \frac{\dot{x}_\tau + \dot{x}^*}{\tau_2^2} - 12 \frac{x_\tau - x^*}{\tau_2^3}, \\ D_{III2} &= 6 \frac{y_\tau - y^*}{\tau_2^2} - \frac{4\dot{y}^* + 2\dot{y}_\tau}{\tau_2}, & D_{III3} &= 6 \frac{\dot{y}_\tau + \dot{y}^*}{\tau_2^2} - 12 \frac{y_\tau - y^*}{\tau_2^3}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для того чтобы движение робота было в целом оптимально [8]:

$$\begin{aligned} I_{II-III} &= \int_0^{\tau - \tau_1} \Phi_{II-III} dt = \int_0^{\tau^*} \Phi_{II} dt + \int_0^{\tau - \tau_1 - \tau^*} \Phi_{III} dt \rightarrow \min, \\ I_{II-III} &= \int_0^{\tau^*} (m^2 \ddot{x}_{II}^2 + m^2 \ddot{y}_{II}^2) dt + \int_0^{\tau_2} (m^2 \ddot{x}_{III}^2 + m^2 \ddot{y}_{III}^2) dt \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (11)$$

необходимо найти соответствующие x^* , y^* , \dot{x}^* , \dot{y}^* , τ^* . Так как точка x^* , y^* должна лежать на окружности радиуса $r(\tilde{\alpha}) \geq r_{\min}$, а вектор скорости центра масс робота должен

быть направлен по касательной к окружности в этой точке (во избежание пересечения траекторией окружности), то справедливы следующие равенства (связи):

$$x^* = x_1 + r(\tilde{\alpha}) \cos \tilde{\varphi}, y^* = y_1 + r(\tilde{\alpha}) \sin \tilde{\varphi}, r(\tilde{\alpha}) \geq r_{\min},$$

$$\dot{x}^* = V^* \cos\left(\tilde{\varphi} - \frac{\pi}{2}\right), \dot{y}^* = V^* \sin\left(\tilde{\varphi} - \frac{\pi}{2}\right),$$
(12)

где x_1, y_1 – координаты центра окружности, описывающей препятствие; V^* – модуль линейной скорости центра масс робота, в момент касания окружности радиуса $r(\tilde{\alpha})$; $\tilde{\varphi}$ – угловая координата точки касания. Значения $\tilde{\varphi}$ и $\tilde{\alpha}$ подбираются (при необходимости) для устранения пересечения траекторией центра масс робота окружности радиуса r_{\min} (опасной зоны вокруг препятствия). Таким образом, подбираются такие значения τ^* и V^* (при допустимых $\tilde{\varphi}$ и $\tilde{\alpha}$), чтобы функционал (11) был минимален. В частности, τ^* и V^* могут быть найдены в результате поиска глобального минимума (11) с заданной точностью ε :

$$|I_{II-m}[i+1] - I_{II-m}[i]| \leq \varepsilon.$$

3. Пример алгоритма навигации системы управления робота

1. Запускается система управления робота и сканирования местности, вводятся оператором начальные: $x_0, \dot{x}_0, y_0, \dot{y}_0$ и конечные: $x_\tau, \dot{x}_\tau, y_\tau, \dot{y}_\tau$ условия движения робота и его параметры (рис. 2, а).

2. Робот планирует свое движение – запускается расчет параметров (6) на основании заданных краевых условий с последующим расчетом законов движения (6) и управляющих воздействий (рис. 2, а).

3. Робот начинает (продолжает) свое движение – реализует синтезированные законы (6) (рис. 2, б).

4. В процессе движения, при обнаружении препятствия, производится идентификация препятствия в виде окружности (R_1, x_1, y_1) и расчет радиуса r_{\min} опасной зоны вокруг этого препятствия (рис. 2, б).

5. Производится проверка пересечения синтезированной (в соответствии с (6)) траектории робота и опасной зоны вокруг препятствия по условию

$$\forall t \in [0, \tau]: \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \geq r_{\min}. \quad (13)$$

5.1. Если условие (13) выполняется, то робот продолжает свое движение по законам (6) (рис. 2, а).

5.2. Если условие (13) не удовлетворяется, то выполняются действия (6)–(8).

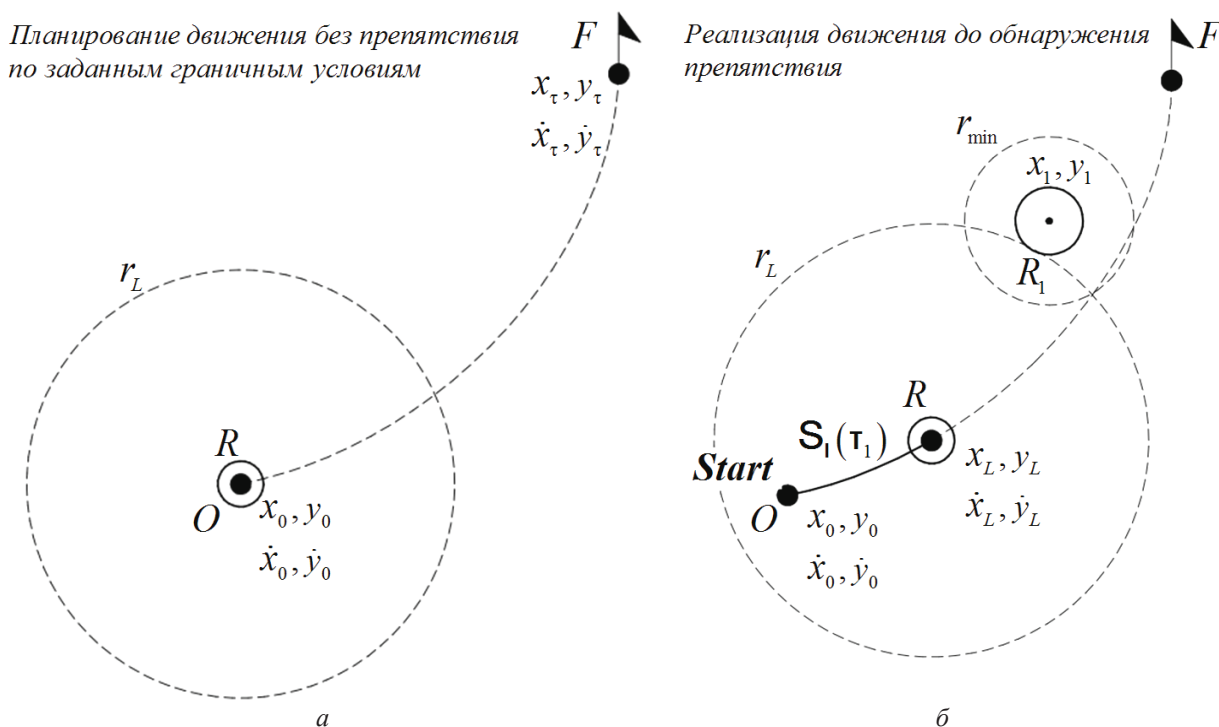
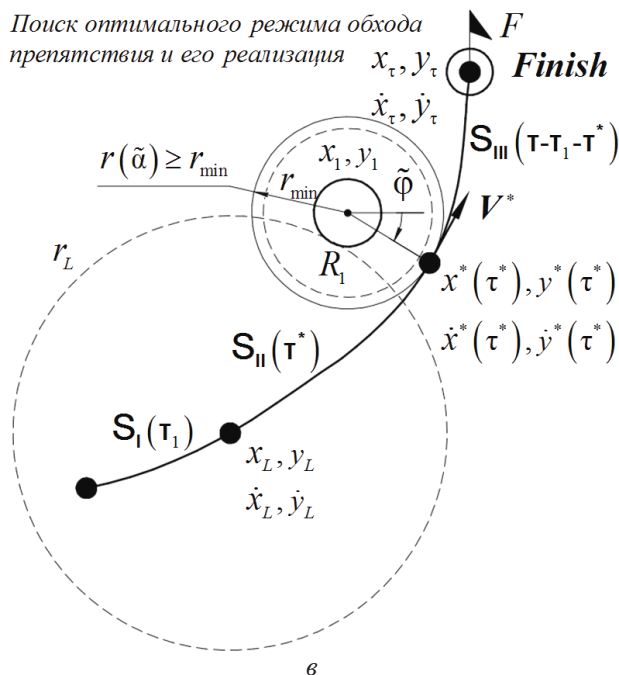


Рис. 2. Обход роботом статичного препятствия (см. также с. 44)



Планирование движения и его реализация по законам :

$$\begin{cases} x_I = x_0 + \dot{x}_0 t + C_{I2} \frac{t^2}{2} + C_{I3} \frac{t^3}{6}, \\ y_I = y_0 + \dot{y}_0 t + D_{I2} \frac{t^2}{2} + D_{I3} \frac{t^3}{6}. \end{cases}$$

(Рис. а, б)

$$\begin{cases} x_{II} = x_L + \dot{x}_L t + C_{II2} \frac{t^2}{2} + C_{II3} \frac{t^3}{6}, \\ y_{II} = y_L + \dot{y}_L t + D_{II2} \frac{t^2}{2} + D_{II3} \frac{t^3}{6}, \end{cases}$$

(Рис. в)

$$\begin{cases} x_{III} = x^* + \dot{x}^* t + C_{III2} \frac{t^2}{2} + C_{III3} \frac{t^3}{6}, \\ y_{III} = y^* + \dot{y}^* t + D_{III2} \frac{t^2}{2} + D_{III3} \frac{t^3}{6}. \end{cases}$$

(Рис. г)

2

Рис. 2. Окончание

6. Для момента времени τ_1 , соответствующего обнаружению препятствия, производится определение из (6) и сохранение в оперативной памяти робота его координат: $x_{II0} = x_L$, $y_{II0} = y_L$, и скоростей: $\dot{x}_{II0} = \dot{x}_L$, $\dot{y}_{II0} = \dot{y}_L$.

7. Запускаются два связанных цикла по варьированию $\tilde{\varphi} \in [0, 2\pi]$ и $\tilde{\alpha} \in (1, \tilde{\alpha}_{stop}]$ с проверкой условия (13), чтобы в случае возникновения пересечения траекторией центра масс робота окружности радиуса $r_{min} = \alpha(R + R_1)$, $\alpha > 1$, устранить его.

7.1 Для текущих (варьируемых) значений $\tilde{\varphi}$ и $\tilde{\alpha}$ запускается (внутри указанных циклов) процедура поиска глобального минимума

функционала (11) – определения оптимальных значений τ^* и V^* (рис. 2, в).

8. Для найденных оптимальных значений τ^* и V^* , подобранных $\tilde{\varphi}$ и $\tilde{\alpha}$ производится расчет параметров и реализация законов движения (8), (10), обеспечивающих безударный обход препятствия оптимальным образом.

4. Компьютерное моделирование

Для исследования предложенного метода автоматической навигации наземного робота (на языке Visual C++) разработан авторский программный инструмент. Для всей серии численных экспериментов (рис. 3–7) были приняты постоянными: $R = 0,5$ м; $r_L = 2$ м; $\tau = 10$ с; $dt = 0,01$ с.

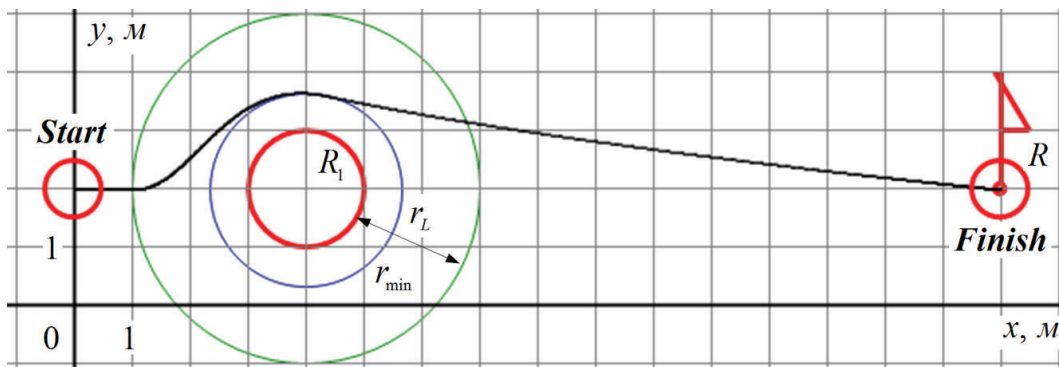


Рис. 3. Результат тестирования при нулевых скоростях в начальной и конечной точках центра масс робота:

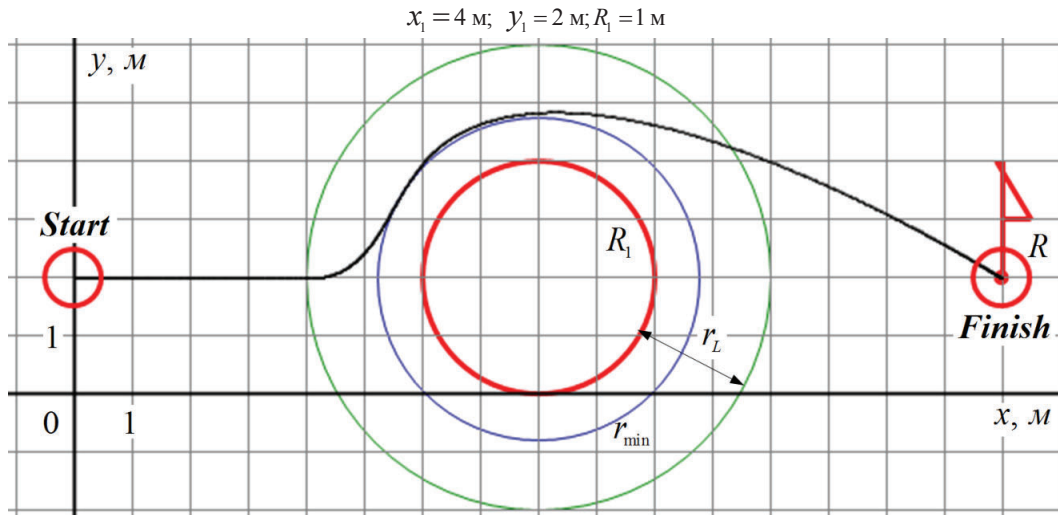


Рис. 4. Результат тестирования при нулевых скоростях в начальной и конечной точках центра масс робота:
 $x_1 = 8 \text{ м}; y_1 = 2 \text{ м}; R_1 = 2 \text{ м}$

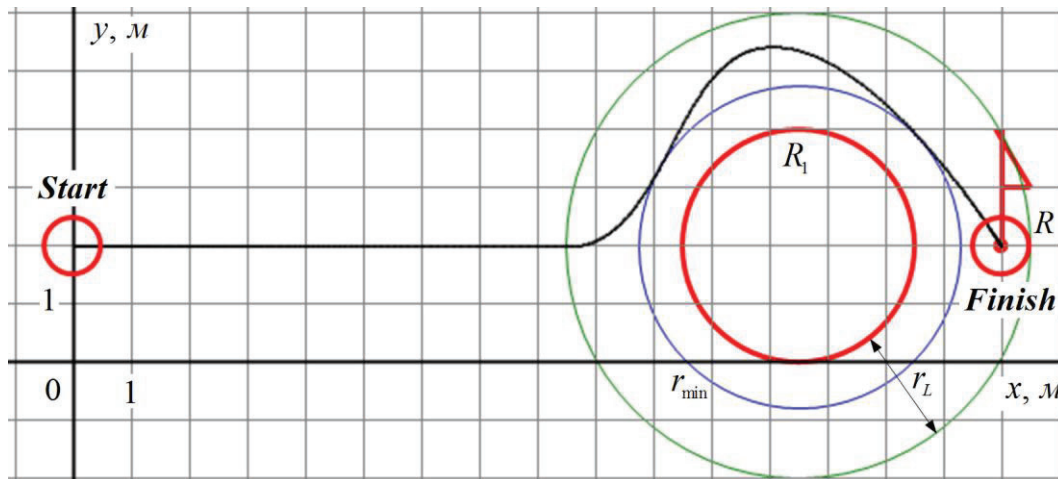


Рис. 5. Результат тестирования при нулевых скоростях в начальной и конечной точках центра масс робота:
 $x_1 = 12,5 \text{ м}; y_1 = 2 \text{ м}; R_1 = 2 \text{ м}$

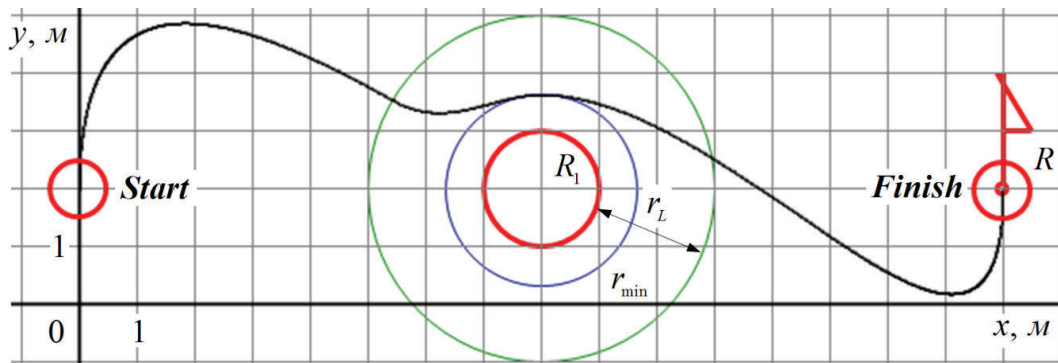


Рис. 6. Результат численного тестирования при скоростях
 $\dot{x}_0 = 0 \text{ м/с}; \dot{y}_0 = 3 \text{ м/с}; \dot{x}_\tau = 0 \text{ м/с}; \dot{y}_\tau = 3 \text{ м/с}$ в начальной и конечной точках

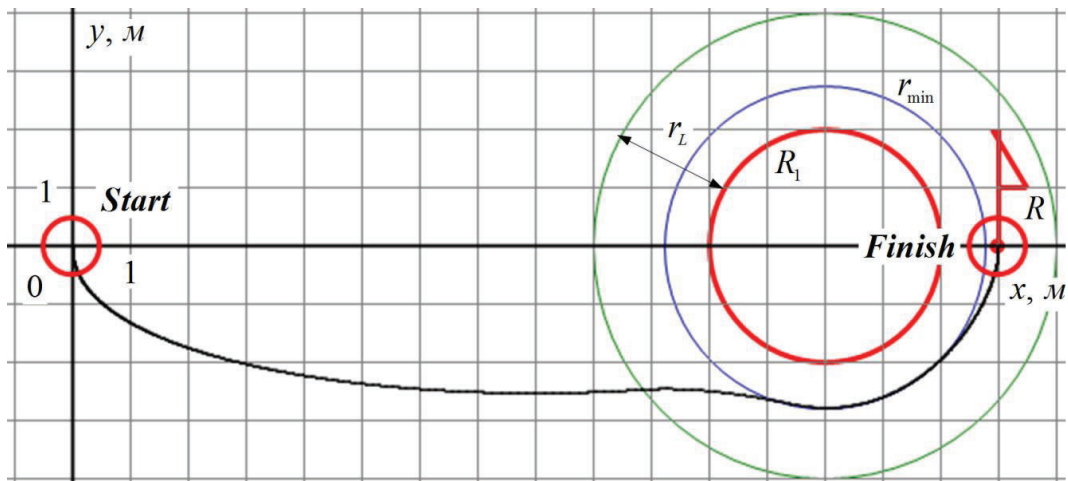


Рис. 7. Результат численного тестирования при скоростях $\dot{x}_0 = 0$ м/с, $\dot{y}_0 = -1$ м/с; $\dot{x}_\tau = 0$ м/с, $\dot{y}_\tau = 1$ м/с в начальной и конечной точках

Заключение

Задача планирования движения наземного робота с обходом одного статичного препятствия сводится к решению трех вариационных подзадач с граничными условиями, две из которых приводят к поиску параметров, обеспечивающих в целом оптимальность движения робота от момента обнаружения препятствия до момента достижения конечной точки. Компьютерное моделирование предложенного метода (алгоритма навигации робота) показывает, что робот оказывается способен обойти статичное препятствие (не соударяясь с ним) и прийти в финальную точку (с требуемой скоростью) за отведенное время. При этом целевая точка может быть размещена непосредственно за препятствием. Предложенный метод планирования движения (с соответствующими уточнениями) может быть использован в реальных системах управления наземных роботов, предназначенных для перемещения в среде с препятствиями, которые удалены друг от друга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chunxi, Cheng. Path planning and obstacle avoidance for AUV: A review / Chunxi Cheng, Qixin Sha, Bo He, Guangliang Li // *Ocean Engineering*. – 2021. – Vol. 235. Article 109355.
2. Лю, В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) / В. Лю // *Математика и математическое моделирование*. – 2018. – № 1. – С. 15–58.
3. Казаков, К. А. Обзор современных методов планирования движения / К. А. Казаков, В. А. Семенов // *Труды ИСП РАН*. – 2016. – Т. 28. – Вып. 4. – С. 241–294.
4. Филимонов, А. Б. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2019. – Т. 20. – № 11. – С. 677–685.
5. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени (VC/APF+BC_τ¹). Ч. I. Теория // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 34–42.
6. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени (VC/APF+BC_τ¹). Ч. II. Результаты / А. В. Леонард // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 42–48.
7. 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. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 51–57.
8. Брискин, Е. С. Об энергетически эффективных режимах движения мобильных роботов с ортогональными шагающими движителями при преодолении препятствий / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, М. В. Мирошкина // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. – 2020. – № 2. – С. 75–82.

УДК 621.865.8
DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-47-50

А. М. Макаров, А. В. Дроботов, И. В. Волков, С. А. Рыжков

ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУХОСЕВОГО ПОВОРОТНОГО СТОЛА И ШЕСТИОСЕВОГО МАНИПУЛЯТОРА В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Волгоградский государственный технический университет

app@vstu.ru

Рассматриваются особенности использования двухосевого поворотного стола и шестиосевого промышленного робота для повышения эффективности аддитивного производства. Предложены методы и алгоритмы совместного управления устройствами. Реализована синхронизация системы управления промышленным роботом со сторонними устройствами для двухсторонней передачи информации без задержки сигнала по времени.

Ключевые слова: аддитивное производство, промышленный робот, Ethernet, протокол Modbus TCP, Kuka KR C4 Compact, поворотный стол.

A. M. Makarov, A. V. Drobotov, I. V. Volkov, S. A. Ryzhkov

FEATURES OF USING TWO-AXIS ROTARY TABLES AND A SIX-AXIS MANIPULATOR IN ADDITIVE MANUFACTURING

Volgograd State Technical University

The features of using a two-axis rotary table and a six-axis industrial robot to increase the efficiency of additive manufacturing are considered. Methods and algorithms of joint control of devices are proposed. Synchronization of the industrial robot control system with third-party devices for two-way transmission of information without time delay is implemented.

Keywords: additive manufacturing, industrial robot, Ethernet, Modbus TCP protocol, Kuka KR C4 Compact, rotary table.

В последние годы плотность роботизации производства растет внушительными темпами, в том числе и в России. Промышленные роботы находят применение в новых для себя областях. Одним из востребованных направлений роботизации является аддитивное производство.

В современном мире аддитивное производство набирает популярность как достаточно быстрый, высокоточный и гибкий метод изготовления деталей.

Рассмотрим особенности совместного использования двухосевых поворотных столов и шестиосевых манипуляторов (в частности, робота KUKA KR3 R540) в аддитивном производстве.

Актуальность данного направления исследования подтверждается коммерческим интересом со стороны производственных предприятий в направлении расширения функциональных возможностей робота и функциональных возможностей установок аддитивного производства.

Быстрое развитие аддитивных технологий, когда изделие изготавливается путем добавле-

ния материала, позволяет судить об актуальности и целесообразности их использования при изготовлении различных изделий не только декоративного, но и промышленного назначения. Рассматривая FDM (FFF) технологию 3D-печати (рис. 1), нельзя не отметить несколько основных факторов, сдерживающих быструю ее интеграцию в процесс производства функциональных изделий.

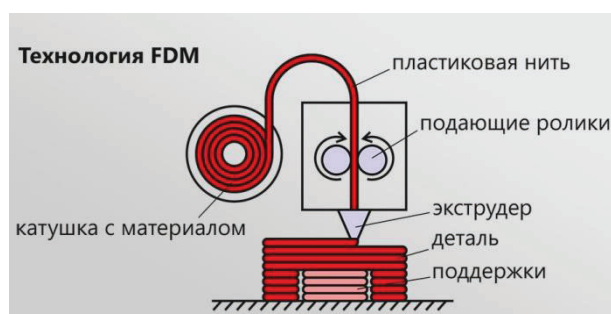


Рис. 1. Принцип технологии FDM

Первый связан с существенным отличием физических свойств напечатанного изделия в различных направлениях из-за ориентации сло-

ев при построении изделия. Например, согласно исследованиям [1, 2], предел прочности при растяжении поперек слоев для различных материалов, используемых при 3D-печати, гораздо (иногда в несколько раз) ниже, чем предел прочности при растяжении вдоль слоев. Второй связан с тем, что материал расплавляется и наносится на относительно холодное основание (стол или предыдущие слои), а затем быстро охлаждается и затвердевает. При этом он дает усадку (уменьшается в линейных размерах), иногда до 3–5 %. Это часто сопровождается деформациями изделия уже в процессе изготовления и обуславливает напряженное состояние в изделии, приводящее к появлению трещин (расслаивание).

Третий фактор связан с необходимостью выстраивания одноразовых поддерживающих конструкций под нависающими элементами сложного изделия, чтобы оно не обвалилось в процессе печати. На их создание тратится время и материал. Затем они механически удаляются. В местах их соприкосновения с изделием качество поверхности снижается и требуется дополнительная обработка.

Для решения данных проблем при FDM-печати сотрудниками кафедры автоматизации

производственных процессов ВолгГТУ совместно с ООО «Стереотек» разработан способ (и устройство для его осуществления) формирования изделия из пространственных криволинейных слоев [2–4]. Данная технология реализована в виде промышленного производства многоосевых аддитивных установок (5D-принтеров).

Для расширения функциональных возможностей и области печати, а значит качества и размеров изделий, получаемых с помощью данной технологии, может быть использован промышленный робот, на который в качестве рабочего органа устанавливается экструдер.

Для реализации такого способа аддитивного производства необходима синхронизация в реальном времени системы управления промышленного робота со сторонней системой управления, обрабатывающей G-код и управляющей процессом печати.

Нами реализована синхронизация системы управления промышленным роботом Kuka KR C4 Compact со сторонними устройствами для двухсторонней передачи информации без задержки сигнала по времени. На рис. 2 показана экспериментальная установка для исследования работоспособности данной системы.



Рис. 2. Экспериментальная установка на базе промышленного робота Kuka с системой управления KRC4 Compact

Управление Kuka KR C4 Compact осуществляется через встроенный контроллер, который позволяет настраивать различные параметры робота и взаимодействовать с периферийными устройствами [5].

Разработка методов параллельного взаимодействия – это задача, связанная с разработкой алгоритмов и программного обеспечения, которые обеспечивают эффективное взаимодействие робота с периферийными устройствами. Для этого использовались различные подходы, такие как моделирование системы, оптимизация алгоритмов и разработка интерфейсов для взаимодействия [6].

Взаимодействие происходит между сторонним компьютером и встроенной системой управления через Ethernet-порт при помощи протокола Modbus TCP. Данный протокол работает поверх TCP/IP и использует формат передачи сообщений, определенный для протокола Modbus. Он поддерживает множество операций, включая чтение и запись регистров, чтение и запись значений битов, чтение значений счетчиков и др.

Для реализации аддитивного производства на базе промышленного робота KUKA KR3 R540 могут быть использованы различные программы. Выбор программного обеспечения зависит от конкретных потребностей проекта,

бюджета и предпочтений в интерфейсе и функциональности. Были рассмотрены такие пакеты, как KUKA rgs, который интегрируется с визуальным редактором программирования Grasshopper, что позволяет пользователям легко создавать сложные алгоритмы без необходимости глубоко знать кодирование.

RoboDK позволяет проводить симуляции, программирование и оптимизацию роботизированных систем, таких как KUKA KR3 R540, для аддитивного производства.

KUKA Sim Pro позволяет моделировать и оптимизировать процессы работы робота перед реальной имплементацией. Он также способен генерировать KRL (KUKA Robot Language) код, который может быть загружен непосредственно на робота.

В зависимости от конкретных целей каждого проекта и уровня его сложности, выбор программы может варьироваться. Важно рассмотреть те характеристики, которые наиболее важны для конкретной задачи, и выбрать программное обеспечение, которое лучше всего соответствует этим требованиям.

Для реализации 5D-печати был разработан специализированный двухосевой поворотный стол (рис. 3), приводимый в движение двумя шаговыми двигателями, которые управляются при помощи RAMPS.



Рис. 3. Двухосевой поворотный стол и блок управления

Разработка программного обеспечения для синхронизации двух устройств производилась на языке программирования Python. На рис. 4 показан фрагмент программы для установки

Ethernet-соединения между платой Arduino, управляющей поворотным столом, и компьютером, на котором работает RoboDK.

```
import socket
import time

# Параметры соединения
arduino_ip = "192.168.1.177"
arduino_port = 23

# Установить соединение
s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
s.connect((arduino_ip, arduino_port))

# Отправить команду на Arduino
command = "1" # это просто пример команды, которую Arduino должен обработать
s.sendall(command.encode())

# Закрыть соединение
s.close()
```

Рис. 4. Фрагмент кода управляющей программы

Результаты исследования могут быть использованы компаниями, занимающимися разработкой, производством и внедрением новых решений в области аддитивного производства, позволяющих расширить функциональные возможности аддитивных установок за счет построения многоосевых роботизированных аддитивных устройств на базе промышленных роботов.

БИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. De Filippis, L. Path planning strategies for UAVS in 3D environments / L. De Filippis, G. Guglieri, F. Quagliotti // *Journal of Intelligent & Robotic Systems, Theory Appl*, 2012, vol. 65, no. 1–4, pp. 247–264.

2. Hennersperger C. et al. Towards MRI-based autonomous robotic US acquisitions: a first feasibility study, *IEEE Trans. Med. Imaging*, 2016, vol. 36, no. 2, pp. 538–548.

3. Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Ma-

terial Deposition / А. Р. Авдеев, А. А. Швец, И. А. Гушин, И. С. Торубаров, А. В. Дроботов, А. М. Макаров, А. Л. Плотников, Ю. П. Сердобинцев // *Machines* : [Open Access Journal]. – 2019. – Vol. 7, Issue 3. – 18 p. – DOI:10.3390/machines7030057.

4. Анализ подходов к повышению производительности 3D-печати / И. С. Торубаров, В. М. Труханов, И. А. Гушин, И. В. Мартынович // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (232) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2019. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 69–72.

5. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019617998 от 25 июня 2019 г. Российская Федерация. Расчет траектории перемещения печатающей головки 3D-принтера с дополнительными степенями свободы для печати изделий с дискретным поворотом / А. Ю. Попов, И. А. Гушин, А. В. Дроботов, А. А. Швец, А. Р. Авдеев ; ВолгГТУ. – 2019.

6. Швец, А. А. Управление 3D-принтером с дополнительными степенями свободы / А. А. Швец, А. В. Дроботов, И. А. Гушин, А. Р. Авдеев // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (204) / ВолгГТУ*. – 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 74–77.

УДК 519.834

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-51-59

*Е. А. Марчук¹, Н. Г. Шаронов²***РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ НАТЯЖЕНИЯ
В СИСТЕМЕ ТРОСОВОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РОБОТА
В ФОРМАЛИЗАЦИИ ТЕОРИИ ИГР***¹ Университет Иннополис² Волгоградский государственный технический университет

e.marchuk@innopolis.ru

Описывается метод решения специфической задачи тросового параллельного робота, распределения сил натяжения в системе тросов. Предлагаемый метод основывается на формализации задачи в контексте теории игр, где силы натяжения тросов являются ресурсами, а тросы – игроками. Оптимальное решение задачи находится через определение вектора Шепли для коалиции игроков. С использованием численного моделирования производится сравнение оптимального решения для кооперативной игры с оптимальным решением в неотрицательных наименьших квадратах.

Ключевые слова: трос, натяжение, распределение ресурсов, теория игр, тросовый робот.

*Е. А. Marchuk¹, N. G. Sharonov²***PROBLEM OF TENSION DISTRIBUTION IN A SYSTEM
OF CABLE-DRIVEN PARALLEL ROBOT: GAME THEORY FORMALIZATION**¹ Innopolis University² Volgograd State Technical University

The article deals with a specific problem of cable-driven parallel robot, namely the problem of tension distribution in cable system. The proposed method is based on the formalization a problem of tension distribution in terms of Game Theory, the cables assumed the players, and forces in cables assumed the resources. Optimal solution has been found with a concept of Shapley value, and then compared with a solution in non-negative least squares.

Keywords: cable, tension, resource distribution, game theory, cable-driven robot.

Введение

Специфической задачей автоматического управления тросовых параллельных роботов является задача распределения сил натяжения в системе тросов. Известны численные методы поиска оптимального распределения сил натяжения в системе тросов: метод Дайкстры, метод пункций и т. д. [1, 2]. В некоторых случаях возможно аналитическое решение, примеры приводятся авторами [3]. Методы разработки и проектирования тросовых параллельных роботов, в том числе относящиеся к автоматическому управлению роботом, продолжают развиваться; наиболее полное описание тросовой робототехники приводится авторами [4, 5]. Обратим внимание, что в приведенных выше источниках примеры решения задачи распределения сил натяжения в системе тросов не используют методы искусственного интеллекта. Таким образом, формализация задачи распределения сил натяжения в системе тросов с ис-

пользованием методов искусственного интеллекта в области тросовой робототехники может обладать научной новизной.

Заметим, что класс задач распределения ресурсов между несколькими действующими лицами может быть проиллюстрирован классическими примерами теории игр. Теория игр возникла в 20-е гг. XX века и изначально была посвящена проблемам экономики [6]. Однако в дальнейшем основные понятия теории игр были обобщены с учетом более широкого спектра задач, и в настоящее время используются далеко за пределами экономических моделей. В инженерных науках известны теоретико-игровые методы расчетов статических конструкций, теоретико-игровое автоматическое управление, теоретико-игровые методы проектирования сетей и т. д. [7–10]. Отождествление свойств объекта исследования с некоторыми характерными чертами поведения живых и разумных действующих лиц является ключевой идеей теории игр.

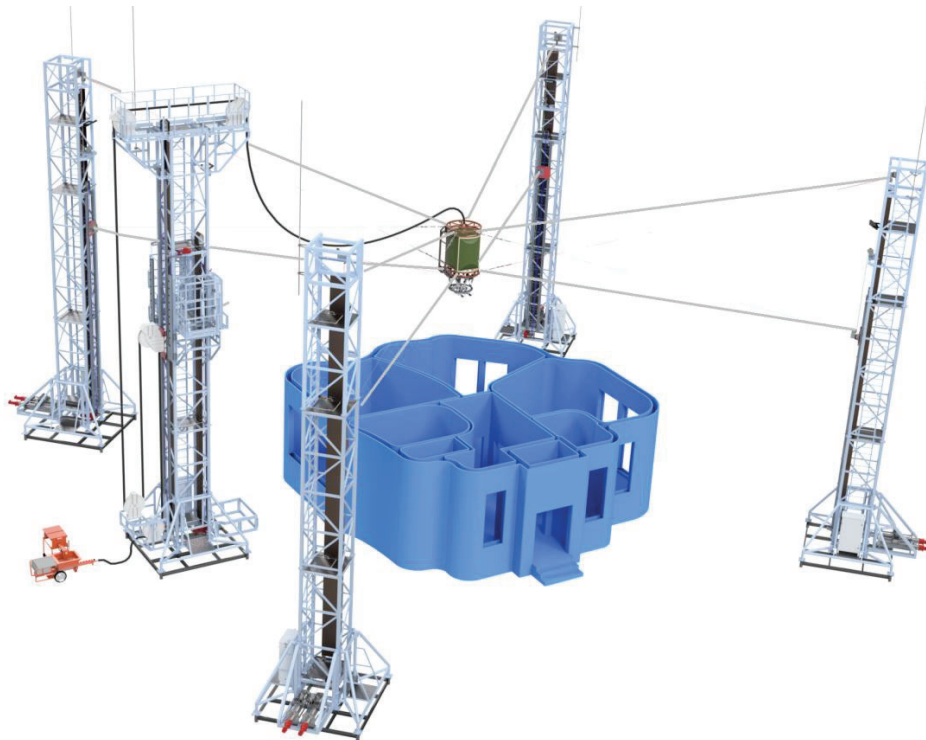


Рис. 1. Модель строительного роботизированного комплекса Университета Иннополис

Задача компенсации внешнего воздействия

В настоящей статье задача распределения сил натяжения в системе тросов рассматривается на примере крупногабаритного тросового параллельного робота, предназначенного для строительства зданий методом аддитивных технологий (Университет Иннополис). Согласно разработанной концепции автоматического управления крупногабаритным тросовым параллельным роботом, система тросов делится на две подсистемы: группу верхних и группу нижних тросов [11, 12]. Для указанного примера строительного роботизированного комплекса задача распределения сил натяжения в системе тросов становится актуальной при появлении внешнего воздействия [11, 12]. Для заданной конфигурации тросовой системы основная нагрузка при возникновении реакций на типичное внешнее воздействие (к примеру, натяжение подающего шланга) распределяется в группе нижних тросов [13]. Далее рассматривается задача распределения сил натяжения применительно к группе нижних тросов крупногабаритного тросового параллельного робота.

В векторном представлении кинематика тросовой системы приобретает вид:

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

где \mathbf{l}_i – вектор, соединяющий точку схода i -го троса с направляющего ролика с точкой креп-

ления троса к рабочему инструменту робота; \mathbf{a}_i – вектор, соединяющий начало неподвижной системы координат с точкой схода i -го троса с направляющего ролика; \mathbf{R} – матрица поворота; \mathbf{b}_i – вектор, соединяющий начало подвижной системы координат с точкой крепления троса к рабочему инструменту робота; \mathbf{r} – радиус-вектор, соединяющий начало неподвижной системы координат с началом подвижной системы координат.

Матрица Якоби используется для перевода скоростей из пространства приводов в пространство рабочего инструмента робота. Для нижней группы тросов рассматриваемого робота матрица приобретает вид:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{l}_1}{\|\mathbf{l}_1\|_2} & \dots & \frac{\mathbf{l}_4}{\|\mathbf{l}_4\|_2} \\ \mathbf{b}_1 \times \frac{\mathbf{l}_1}{\|\mathbf{l}_1\|_2} & \dots & \mathbf{b}_4 \times \frac{\mathbf{l}_4}{\|\mathbf{l}_4\|_2} \end{bmatrix}^{3 \times 4}. \quad (2)$$

Также матрица (2) удобна для перевода сил и моментов между обозначенными выше пространствами.

Будем полагать, что автоматическое управление группой четырех верхних тросов восьми-тросового робота обеспечивает «скольжение» мобильной платформы в горизонтальной плоскости с незначительными отклонениями по углам крена и тангажа [11, 12]. Тогда для группы

нижних тросов, лежащих в горизонтальной плоскости согласно заданной конфигурации, задача статического равновесия может рассматриваться как плоская задача. Согласно принципу Даламбера

$$\mathbf{J}^{3 \times 4} \mathbf{f}_c^{4 \times 1} + \mathbf{w}^{3 \times 1} = \mathbf{0}^{3 \times 1}, \quad (3)$$

где \mathbf{J} – матрица Якоби; \mathbf{f} – вектор сил натяжений в тросах; \mathbf{w}_p – вектор внешних сил и моментов.

Система неопределенна, поскольку пластина (нижняя часть мобильной платформы) с тремя степенями свободы в рассматриваемом примере плоской задачи приводится в движение четырьмя приводами. В таком случае, общее решение системы линейных алгебраических уравнений (3) имеет вид:

$$\mathbf{f}_c^{4 \times 1} = \mathbf{f}_p^{4 \times 1} + \mathbf{f}_s^{4 \times 1}. \quad (4)$$

Очевидно, что решение системы (3) не представляет затруднений в случае отсутствия каких-либо ограничений на компоненты найденного вектора сил.

Однако при появлении внешнего воздействия для компенсации отклонения от состояния равновесия системы при задействовании всех четырех тросов часть тросов должна «толкать» вместо того, чтобы «тянуть». Но поскольку тросы являются односторонними связями,

«толкающее» усилие некоторых тросов оказывается нулевым, и система (3) трансформируется из неопределенной системы в определенную или переопределенную. Отсюда следует вывод, что решение системы (3) должно удовлетворять условию неотрицательных компонентов вектора сил натяжений в тросах при существовании такого решения.

Решение в неотрицательных наименьших квадратах

Одним из способов решения задачи распределения сил натяжения в тросовой системе может стать решение в неотрицательных наименьших квадратах [14]. Авторами разработан вычислительный метод, предполагающий двухэтапное нахождение оптимального решения в наименьших квадратах [15]. На первом этапе решается задача нахождения минимальной нормы наименьших квадратов. Полученные отрицательные компоненты вектора решения и соответствующие им столбцы матрицы обнуляются, поскольку тросы достаточно большой длины могут тянуть, но не могут толкать. Затем повторяется процедура нахождения минимальной нормы наименьших квадратов. Следует заметить, что качество управления нижней группой тросов ухудшается при увеличении числа нулевых элементов вектора решения.

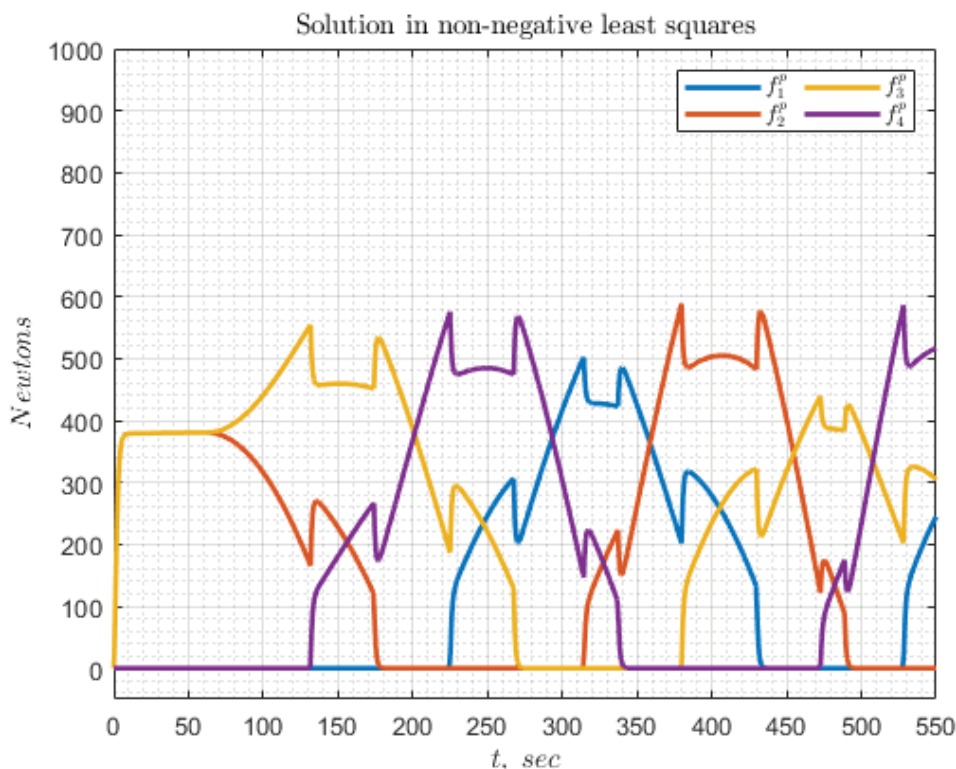


Рис. 2. Силы натяжения тросов в конфигурационном пространстве: решение в неотрицательных наименьших квадратах

Метод неотрицательных наименьших квадратов обеспечивает оптимальное решение и обладает достоинством простоты алгоритма вычисления. Предложенный метод может применяться в задачах управления крупногабаритного тросового параллельного робота в реальном времени. Однако численное моделирование показывает, что в моменты перераспределения сил натяжения появляются резкие провалы, которые могут стать причиной нежелательных колебаний мобильной платформы крупногабаритного тросового параллельного робота (рис. 2).

Решение кооперативной игры для четырех игроков: вектор Шепли

В качестве альтернативного способа решения задачи распределения сил натяжения в тросовой системе рассмотрим теоретико-игровой подход. При формализации задачи распределения сил натяжения в системе тросов в контексте теории игр полагается, что каждый участник игры «трос» участвует в производстве некоторого продукта, которым в настоящей задаче является вектор сил и моментов в рабочем пространстве робота, с использованием некоторых ресурсов, которыми в настоящей задаче являются компоненты вектора сил в конфигурационном пространстве робота. Для достиже-

ния максимальной выгоды, игроки могут объединяться в коалиции. Таким образом, мы формализовали задачу распределения сил натяжения в системе тросов как кооперативную игру.

После формализации в контексте теории игр задача может быть решена, к примеру, с использованием геометрического подхода. Алгоритм решения основан на поиске точки, лежащей в пространстве ядра игры внутри n -мерного симплекса; для четырех игроков полагается $n = 4$.

$$\begin{aligned} v(C) &= \max_{x \geq 0} (c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 x_4) \\ j_{11} x_1 + j_{12} x_2 + j_{13} x_3 + j_{14} x_4 &\leq F_x \\ j_{21} x_1 + j_{22} x_2 + j_{23} x_3 + j_{24} x_4 &\leq F_y \\ j_{31} x_1 + j_{32} x_2 + j_{33} x_3 + j_{34} x_4 &\leq M_0 \\ x_1, x_2, x_3, x_4 &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Нахождение ядра игры предполагает нахождение области внутри симплекса, образованной пересечением гиперплоскостей, задающих ограничения в (5). Координаты искомой точки, принадлежащей ядру игры, определяются в соответствии с понятием вектора Шепли, что соответствует оптимальному решению задачи распределения ресурсов с учетом влияния каждого игрока на коалицию.

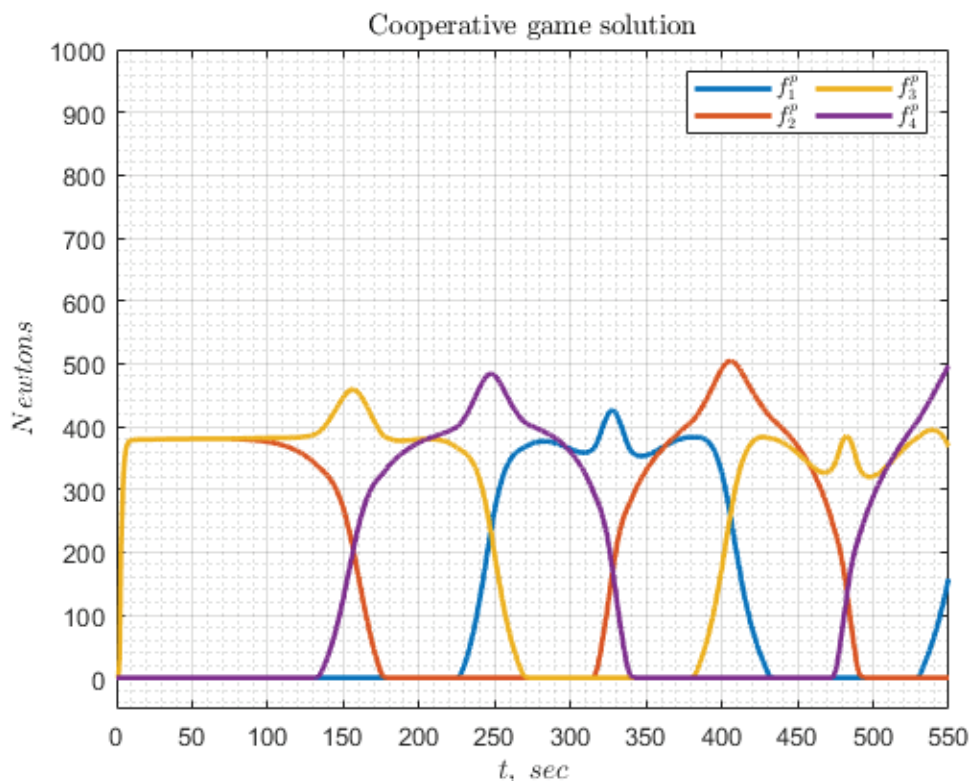


Рис. 3. Силы натяжения тросов в конфигурационном пространстве: решение кооперативной игры для четырех игроков (вектор Шепли)

Метод кооперативной игры обеспечивает оптимальное решение в смысле вектора Шепли и обладает достоинством простоты алгоритма вычисления. Предложенный метод может применяться в задачах управления крупногабаритного тросового параллельного робота в реальном времени. Численное моделирование показывает, что в моменты перераспределения сил натяжения резких провалов не происходит, силы натяжения в тросах изменяются плавно (рис. 3).

Численное моделирование

Численный эксперимент проводится следующим образом: для некоторого внешнего усилия, приложенного к мобильной платформе крупногабаритного тросового параллельного робота, находятся реакции в проекции на пространство конфигураций в соответствии с критерием неотрицательных компонентов вектора сил натяжений в тросах.

На рис. 4 приводится сравнение решения в неотрицательных наименьших квадратах с решением кооперативной игры для четырех игроков.

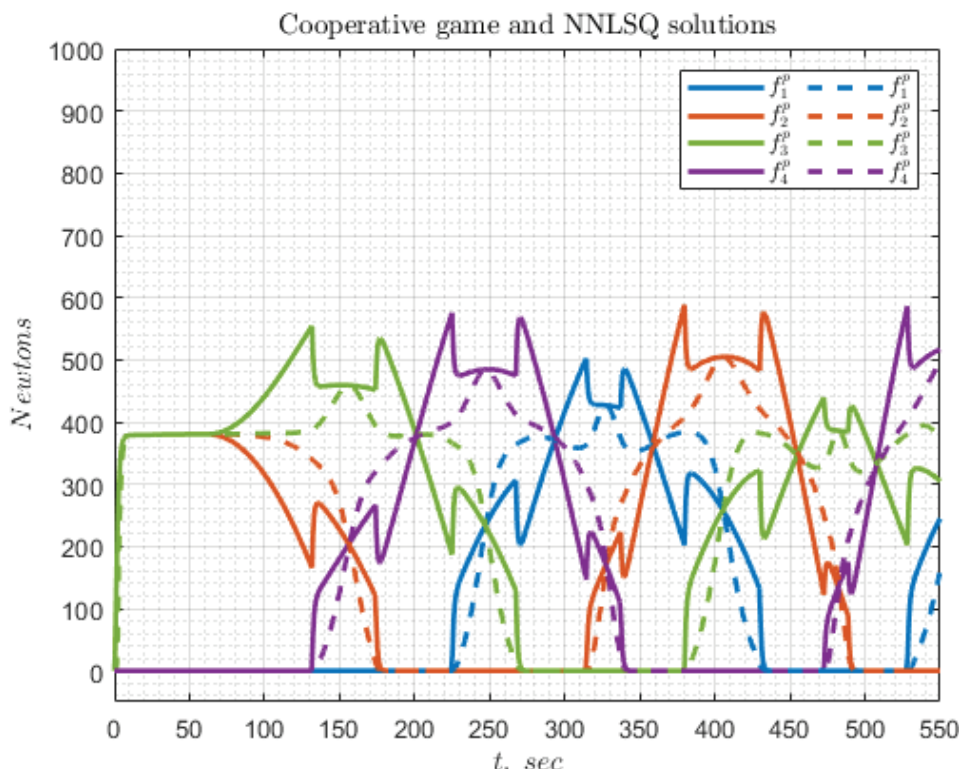


Рис. 4. Сравнение решений задачи оптимального распределения сил натяжения тросов в конфигурационном пространстве: кооперативной игры (пунктирная линия) и неотрицательных наименьших квадратов (сплошная линия)

Для обоих методов найденное решение неотрицательных компонентов вектора сил натяжений в тросах проецируется из пространства конфигураций в рабочее пространство робота и сравнивается с вектором сил и моментов внешнего усилия в рабочем пространстве робота, рис. 5.

Решение в неотрицательных наименьших квадратах обеспечивает практически полное соответствие проекции решения заданному внешнему воздействию.

Решение кооперативной игры для четырех игроков обеспечивает неполное соответствие проекции решения заданному внешнему воздействию, однако дальнейшая проверка показывает эффективность предложенного метода.

Конечной целью регулирования натяжения системы тросов является минимизация отклонений мобильной платформы крупногабаритного тросового параллельного робота от заданных значений положения и ориентации при появлении внешнего воздействия на мобильную платформу.

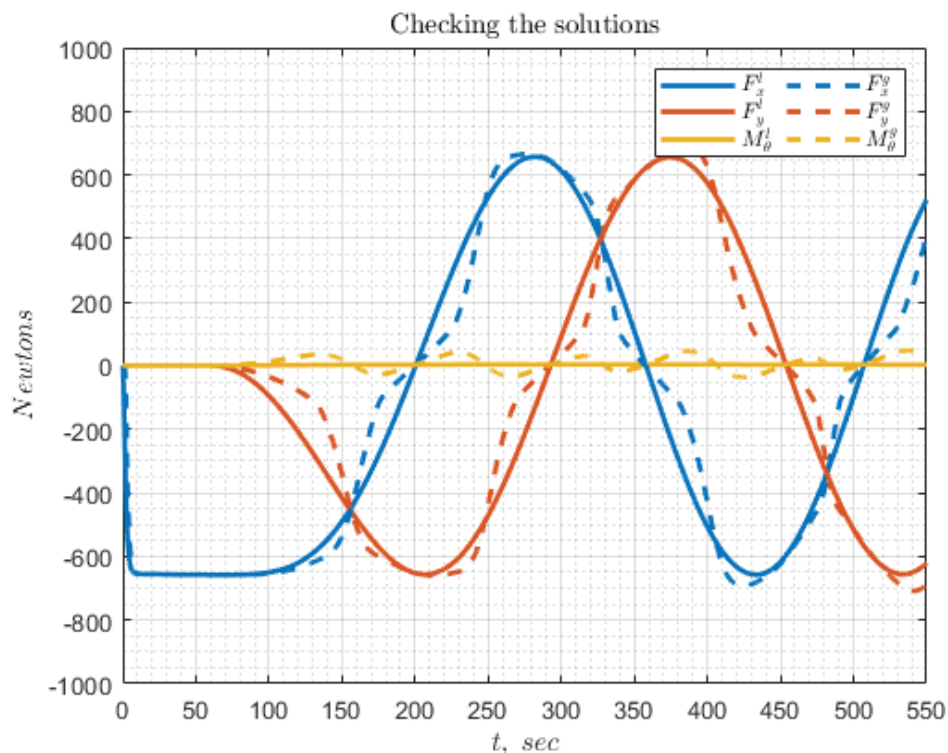


Рис. 5. Сравнение решений задачи оптимального распределения сил натяжения тросов в рабочем пространстве робота: кооперативной игры (пунктирная линия) и неотрицательных наименьших квадратов (сплошная линия)

На рис. 6 приводится пример отклонений от заданных значений положения и ориентации мобильной платформы при движении по задан-

ной траектории с присоединенным подающим шлангом без коррекции сил натяжения нижней группы тросов.

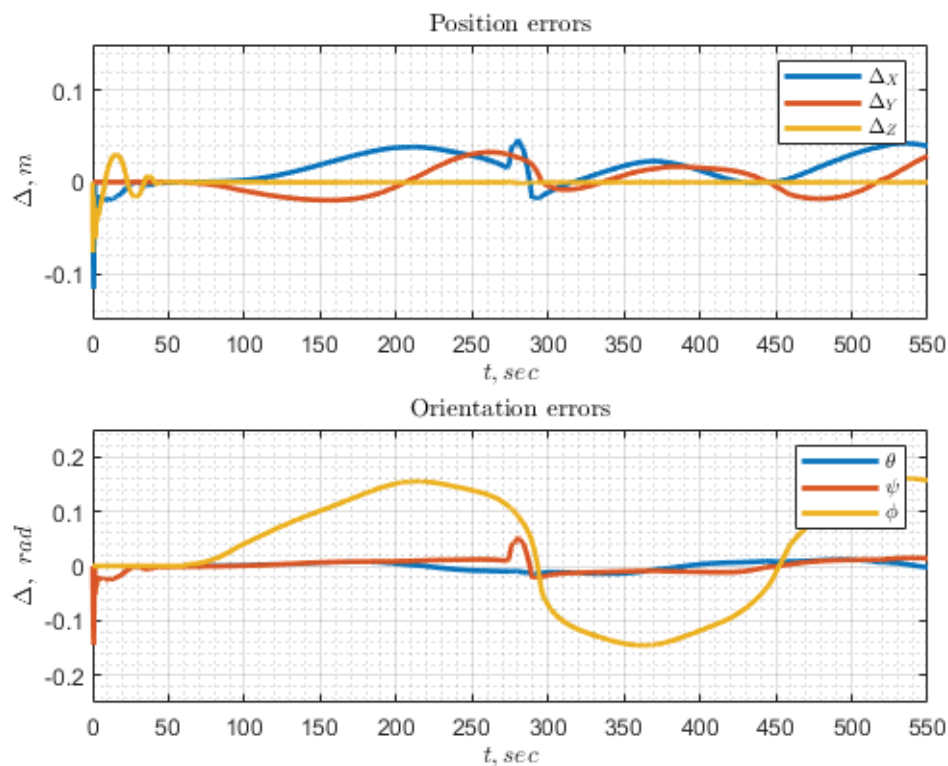


Рис. 6. Отклонения мобильной платформы с присоединенным шлангом подачи строительной смеси (без коррекции сил натяжения нижней группы тросов)

Численное моделирование показывает, что в отсутствие коррекции распределения сил натяжения в тросовой системе отклонения от заданного положения мобильной платформы невелики, и средние значения не превышают 5×10^{-2} м в движении со скоростью не более $2,5 \times 10^{-1}$ м/с при линейных размерах робота в десятки метров и массе мобильной платформы в сотни килограммов [16]. При этом отклонения от заданной ориентации мобильной платформы относительно поворотов вокруг вертикальной оси до $1,5 \times 10^{-1}$ рад считаются довольно большими.

На рис. 7 и 8 приводятся примеры отклонений от заданных значений положения и ориентации мобильной платформы при движении по заданной траектории с присоединенным подающим шлангом и с коррекцией сил натяжения нижней группы тросов.

Численное моделирование показывает, что для обоих предложенных методов регулирования распределения сил натяжения в тросовой системе отклонения от заданного положения мобильной платформы уменьшаются приблизительно в два раза, и средние значения не пре-

вышают 2×10^{-2} м в движении со скоростью не более $2,5 \times 10^{-1}$ м/с при линейных размерах робота в десятки метров и массе мобильной платформы в сотни килограммов. Отклонения от заданной ориентации мобильной платформы относительно поворотов вокруг вертикальной оси также уменьшаются приблизительно в два раза, и средние значения не превышают 8×10^{-2} рад, что можно считать хорошим результатом.

Заметим, что несмотря на неполное соответствие проекции решения заданному внешнему воздействию для метода кооперативной игры, конечный результат практически не отличается от метода неотрицательных наименьших квадратов (рис. 7 и 8). Незначительное отличие можно наблюдать в отклонениях относительно поворотов вокруг вертикальной оси на интервале от 50 до 250 секунды движения мобильной платформы.

Также следует отметить отсутствие заметных колебаний мобильной платформы в моменты перераспределения сил натяжения при использовании как метода кооперативной игры, так и метода неотрицательных наименьших квадратов.

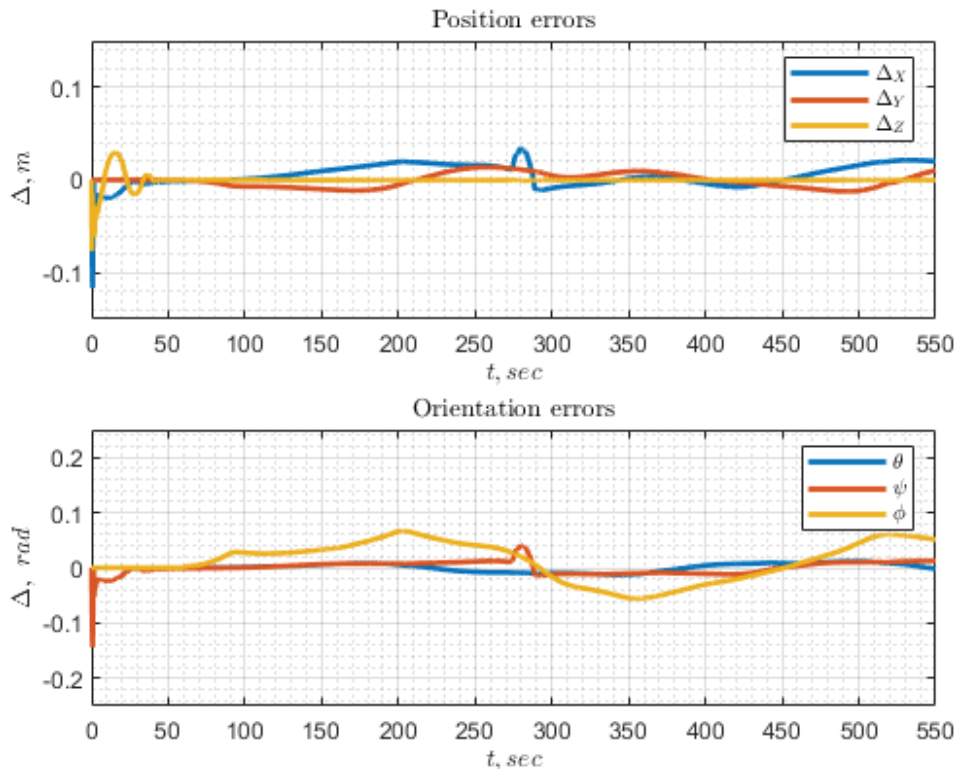


Рис. 7. Отклонения мобильной платформы с присоединенным шлангом подачи строительной смеси (распределение сил натяжения нижней группы тросов как решение кооперативной игры)

Выводы

В настоящем исследовании предложен метод решения специфической задачи тросового параллельного робота, распределения сил натяжения в системе тросов, основанный на теоретико-игровом представлении распределения ресурсов между действующими лицами.

Результатом данной работы является под-

тверждение эффективности предложенного теоретико-игрового метода распределения сил натяжения в системе тросов крупногабаритного тросового параллельного робота, полученное в результате численного моделирования движения мобильной платформы параллельного тросового робота с присоединенным подающим шлангом.

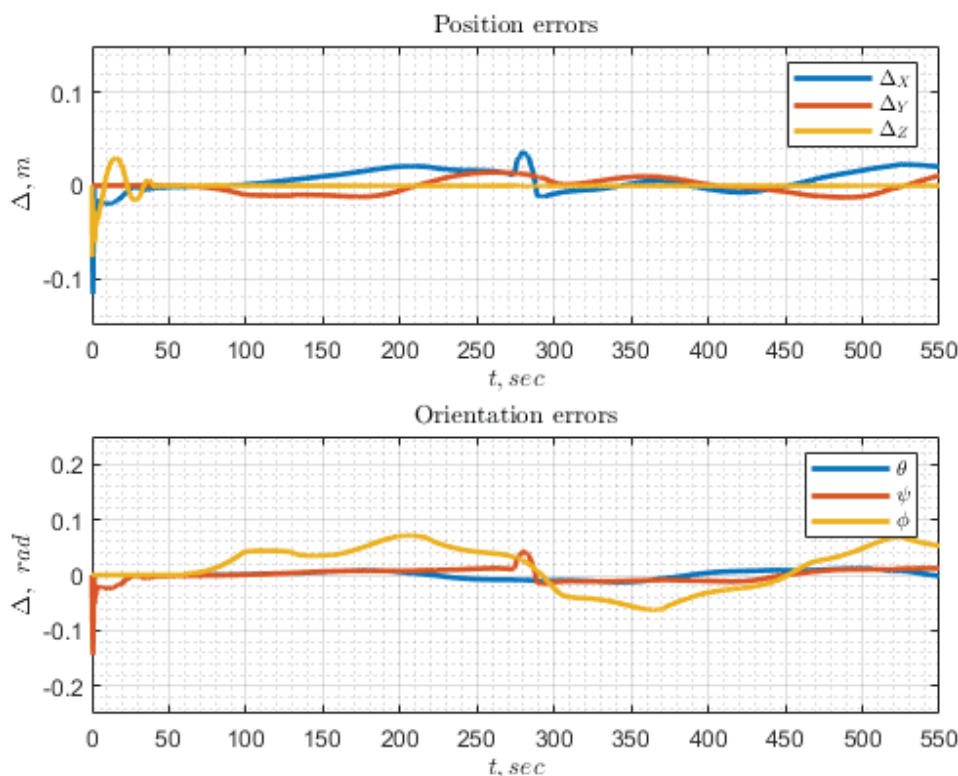


Рис. 8. Отклонения мобильной платформы с присоединенным шлангом подачи строительной смеси (распределение сил натяжения нижней группы тросов как решение в неотрицательных наименьших квадратах)

Компьютерное моделирование показало эффективность предложенного метода кооперативной игры в коррекции отклонений мобильной платформы робота, вызванных натяжением подающего шланга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boyle, J. P. A method for finding projections onto the intersection of convex sets in Hilbert spaces / J. P. Boyle, R. L. Dykstra // *Lecture Notes in Statistics*. – 1986. – № 37. – С. 28–47.
2. Hassan, M. Minimum-norm Solution for the Actuator Forces in Cable-based Parallel Manipulators based on Convex Optimization / M. Hassan, A. Khajepour // *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – 2007. – С. 1498–1503.
3. Mikelsons, L. A real-time capable force calculation algorithm for redundant tendon-based parallel manipulators / L. Mikelsons, T. Bruckmann, D. Schramm, M. Hiller // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. – 2008. – С. 3869–3874.
4. Zi, B. Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications / B. Zi, S. Qian. – Springer, 2017. – 299 с.
5. Pott, A. Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application / A. Pott. – Springer, 2018. – 465 с.
6. Neumann, J. von. Theory of Games and Economic Behavior (60th Anniversary Commemorative Edition) / J. von Neumann, O. Morgenstern, A. Rubinstein. – Princeton University Press, 1944. – 776 p.
7. Bauso, D. Game Theory with Engineering Applications / D. Bauso. – SIAM Series: Advances in Design and Control, 2016. – 276 p.
8. Marden, J. R. Game-Theoretic Learning in Distributed Control / J. R. Marden, J. S. Shamma, // In: Basar, T., Zaccour, G. (eds). *Handbook of Dynamic Game Theory*. – Springer, Cham, 2017. – 1285 p.
9. Rao, S. S. Game theory approach for multiobjective structural optimization / S. S. Rao // *Computers and Structures*. – 1987. – № 25(1). – P. 119–127.
10. Marchuk, E. Mathematical modeling and dynamic processes in chemistry: the game theory approach to the synthesis of polyimides / E. Marchuk, M. Nakhod, Ya. Kalinin // *2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR)*. – 2020. – P. 1.

11. *Marchuk, E.* Error Compensation in Position and Orientation of Mobile Platform of Cable-Driven Robots via Tensile Forces Measurement / E. Marchuk, Ya. Kalinin, A. Maloletov // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie.* – 2022. – № 23(10). – P. 515–522.

12. *Marchuk, E.* On the Problem of Position and Orientation Errors of a Large-Sized Cable-Driven Parallel Robot / E. Marchuk, Ya. Kalinin, A. Sidorova, A. Maloletov // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics.* – 2022. – № 18(5). – P. 755–770.

13. *Marchuk, E.* On Mathematical Modeling of Sagging Elements of Large-Sized Parallel Cable-Driven Robot / E. Marchuk, Ya. Kalinin, M. Ivanou, A. Maloletov // *Izvestia of Volgograd State Technical University.* – 2022. – № 9(268). – P. 56–62.

14. *Lawson, C. L.* Solving Least Squares Problems / C. L. Lawson, R. J. Hanson. – Society for Industrial and Applied Mathematics, 1995. – 350 p.

15. *Marchuk, E. A.* Distribution of Tension Forces in Cable System of Cable-Driven Parallel Robot with Linear Algebra Methods / E. A. Marchuk, A. S. Mikhailov, Ya. V. Kalinin, A. V. Maloletov // *Lobachevskii Journal of Mathematics,* 2023. (*under review*).

16. *Marchuk, E.* On Smooth Planar Curvilinear Motion of Cable-Driven Parallel Robot End-Effector / E. Marchuk, Ya. Kalinin, A. Maloletov // 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control. – 2022. – № 55 (10). – P. 2475–2480.

УДК 681.5

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-59-63

И. А. Несмиянов, А. В. Дяшкин, Н. С. Воробьева, А. Г. Иванов, В. В. Дяшкин-Титов

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА
ПРИ ХРАНЕНИИ ГУРТОВЫМ СПОСОБОМ**

Волгоградский государственный аграрный университет

andrejdyashkin@mail.ru, vgsxa@mail.ru

В статье представлен один из способов диагностирования температурного режима и относительной влажности воздуха зерновой массы при гуртовом хранении в складах на сельскохозяйственных и зерноперерабатывающих предприятиях. Предложена манипуляционная система для перемещения измерительных датчиков в разные точки зерновой массы.

Ключевые слова: система контроля, манипулятор, температурный режим, зерновая масса, влажность воздуха.

I. A. Nesmiyanov, A. V. Dyashkin, N. S. Vorob'eva, A. G. Ivanov, V. V. Dyashkin-Titov

**AUTOMATED GRAIN MOISTURE CONTROL SYSTEM
DURING STORAGE BY THE HERD METHOD**

Volgograd State Agrarian University

The article presents one of the ways to diagnose the temperature regime and relative humidity of the air of grain mass during herd storage in warehouses at agricultural and grain processing enterprises. A manipulation system for moving measuring sensors to different points of the grain mass is proposed.

Keywords: control system, manipulator, temperature regime, grain mass, air humidity.

Применение в агропромышленном комплексе современных технологий возделывания сельскохозяйственных зерновых культур приводит к повышению из года в год урожайности. Во время уборочной кампании основной объем урожая производители стараются перевести на хранение в элеваторы, но в урожайные годы элеваторы переполнены, и часть урожая остается храниться в заготовительных складах. Заготовительные склады строятся рядом с большими сельскохозяйственными комплексами, они удобны в использовании предприятиями для временного хранения собранного урожая, но зачастую используются с целью первичной обработки зерновых культур, а также служат для подготовки семенного зерна к посеву [1]. Многие думают, что рост аграрного бизнеса дости-

гается за счет высокой урожайности зерновых, но вырастить – это одна из задач производства, не менее важно сохранить этот урожай в отличном качестве. По данным исследований в процессе хранения теряется от 10 до 25 % всего урожая. Зерно может портиться, съедаться насекомыми и грызунами или частично терять свои качества; в конечном итоге это приводит к снижению его стоимости. Хранение выращенного урожая зерновых культур является одной из наиболее глобальных задач в больших фермерских хозяйствах. Целью хранения зерна является поддержание качества зернового продукта на протяжении всего необходимого периода. В зависимости от влажности сырья и типа зернохранилища применяется разная технология и метод хранения зерна.

Для оценки состояния зерновой массы используются различные системы мониторинга и диагностики. Например, для хранения зерна в силосном бункере применяется комплексная система дистанционного мониторинга и диагностики состояния зерна, состоящая из системы дистанционного контроля зерна при хранении, системы рециркуляционной фумигации зерна в неподвижном слое и системы консервации зерна от поражения вредителями [2]. Система дистанционного контроля содержит измерители параметров зерновой массы, которые снабжены механизмами подъема и соединительными коробками с размещенными в них измерительными цифровыми блоками. Каждый измеритель параметров зерновой массы представляет собой зонд. В зонде установлены датчик температуры, датчик относительной влажности воздуха, акустический датчик-анализатор двигательной активности насекомых и датчик подсчета насекомых.

При хранении зерна насыпным (гуртовым)

способом для диагностики зерновой массы применяется система контроля температуры хранения зерна СКТ-02, датчики которой располагаются на термоподвесах и термоштангах [3]. Контроль температуры проводится по всей высоте зерновой массы с разбивкой на зоны и секторы, также в процессе диагностики учитывается изменение температуры окружающей среды. Для сбора информации с датчиков, обработки результатов замеров и визуального отображения, обнаруженных очагов саморазогрева и зафиксированных температур предусмотрен контроллерный шкаф. Термоштанга имеет от 2 до 8 точек контроля и представляет собой разборную конструкцию из частей длиной 1,5 м, собираемых в требуемую длину до 6 м.

На основе обзора и анализа представленных систем мониторинга и диагностики зерновой массы авторами статьи разработана автоматизированная система контроля влажности зерна при хранении гуртовым способом (рис. 1).

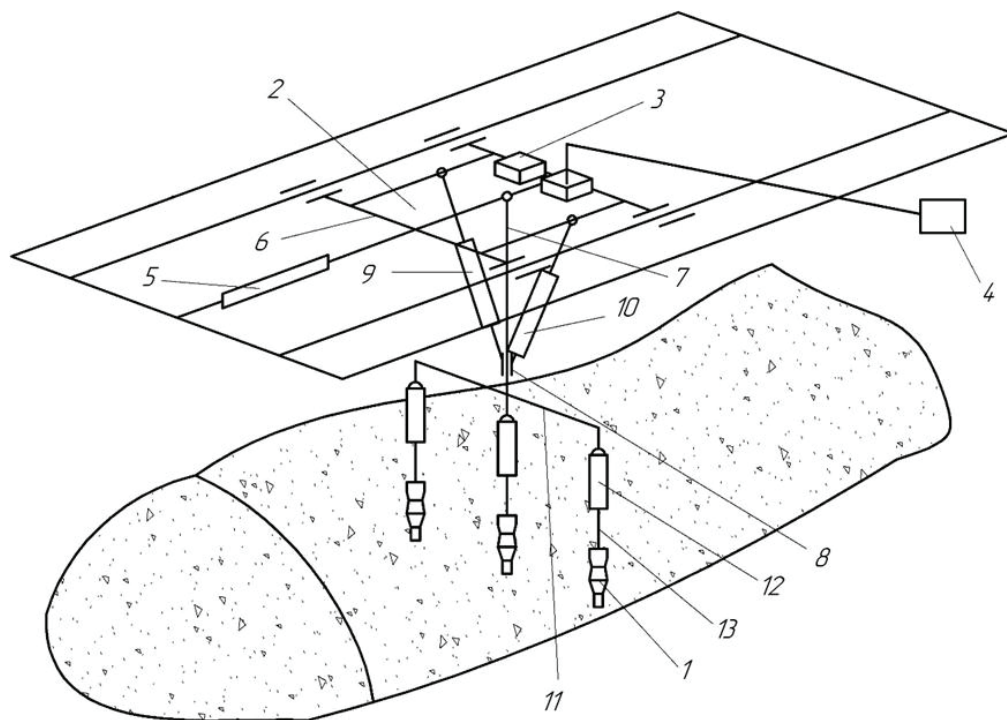


Рис. 1. Схема расположения автоматизированной системы контроля

Предлагаемая автоматизированная система контроля влажности зерна при хранении гуртовым способом состоит из трех измерителей 1 параметров зерновой массы (рис. 2), которые представлены в виде датчиков измерения температуры и относительной влажности воздуха и размещены параллельно между собой и перемещаются в зерновой массе посредством меха-

низмов подъема 2. Все измерители параметров соединены между собой и подключены к блоку питания 3 и компьютеру 4. Для измерения показателей по длине гурта предусмотрен механизм продольного перемещения 5, который расположен над гуртом и перемещает механизм подъема с датчиками системы контроля, как один из вариантов, по направляющим салазкам.



Рис. 2. Измеритель параметров зерновой массы

Механизм подъема 2 представляет собой манипулятор (рис. 3) и состоит из основания 6, в центре которого шарнирно закреплен один из концов кулисы 7 с ползуном 8. По краям основания 6 шарнирно корпусами крепятся два электропривода кулисы 9 и 10, штоки которых соединяются с ползуном 8 и располагаются симметрично под углом относительно оси кулисы 7. Второй конец кулисы 7 жестко соединен с рамкой 11, представленной в виде треугольной фермы, к которой жестко крепятся корпусами параллельно между собой три электропривода штанг 12. Штоки трех электроприводов штанг 12 соединяются со штангами 13, на концах которых установлены измерители 1 параметров зерновой массы. Степень подвижности датчиков $W=3$.

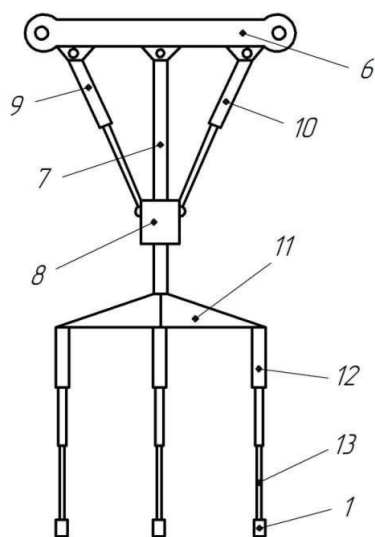


Рис. 3. Механизм подъема

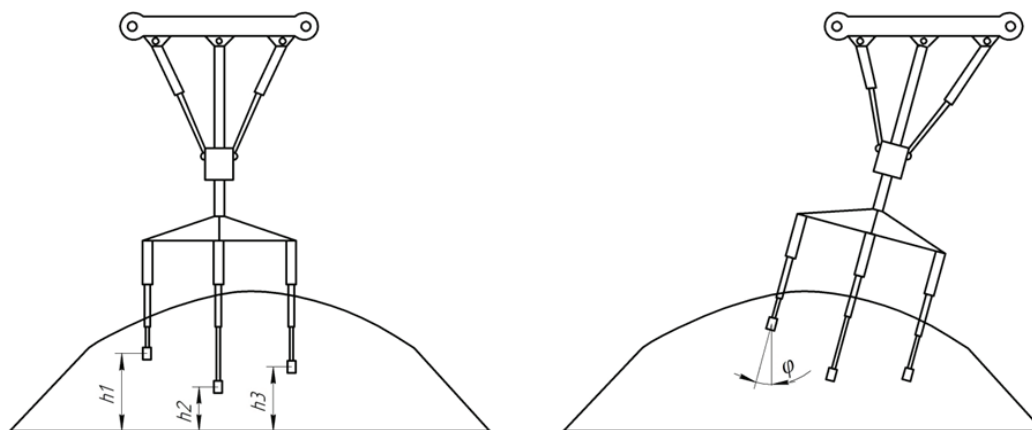


Рис. 4. Варианты замера температуры и влажности в разных точках зернового бурта

Принцип работы автоматизированной системы контроля влажности зерна при хранении гуртовым способом осуществляется следующим образом.

Включением механизма продольного перемещения 5 осуществляется передвижение по салазкам механизма подъема 2 с датчиками в зону замера. Изменение длины хотя бы одного из электроприводов кулисы 9 или 10 механизма подъема 2 способствует изменению положения кулисы 7, скользящей через ползун 8. Вследствие этого кулиса 7, осуществляет поворот относительно своей оси под углом φ в вертикальной плоскости. Изменение длины трех электроприводов штанг 12 способствует изменению высоты точек замеров датчиков. С помощью механизма подъема 2 измерители 1 параметров устанавливаются в зерновую массу. Датчиками температуры и относительной влажности измеряют текущие показатели температуры и относительной влажности и передают их на компьютер 4, на котором осуществляется отображение мгновенных значений измеряемых параметров. Для позиционирования датчика температуры и влажности в разных точках зернового бурта возможно несколько вариантов, представленных на рис. 4. Для вертикального погружения датчика в бурт кулиса 7 устанавливается перпендикулярно основанию 6 манипулятора посредством двух электроприводов кулисы 9 и 10. Штоки трех электроприводов штанг 12 выдвигаются вместе со штангами 13, погружая датчики в бурт на нужную глубину h . Для погружения датчиков в бурт под углом φ , например, влево – шток электропривода кулисы 9 втягивается, а шток электропривода кулисы 10 выталкивается. Затем также штоки электроприводов 12 выдвигаются, заглубляя штанги 13 с датчиками в бурт. Аналогично происходит погружение датчика под заданным углом φ вправо.

Для вертикального погружения датчиков

приводов кулисы 9 и 10 по циклограмме (рис. 5) и описан порядок включения приводов.

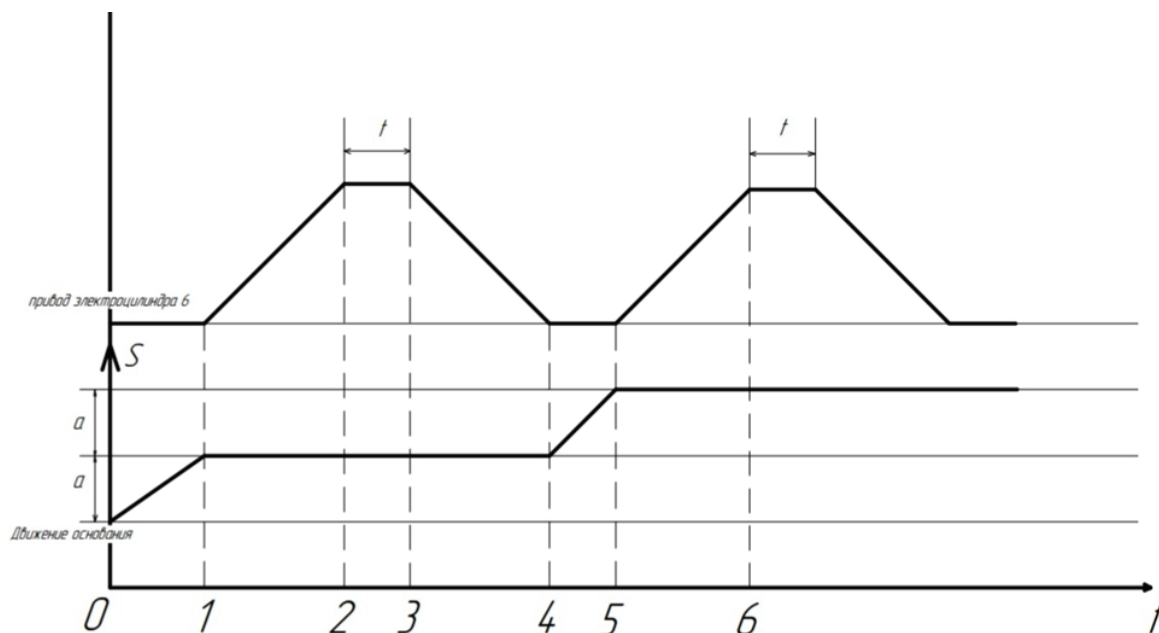


Рис. 5. Программные движения электроприводов кулисы

На участке 0–1 включается двигатель перемещения основания манипулятора *б* по направляющим салазкам (рис. 1), в конце участка двигатель выключается. На участке 1–2 включается привод электроцилиндра *12* для погружения датчика в бурт. На участке 2–3 все приводы выключаются, в течение времени *t* происходит замер влажности и температуры. Затем на участке 3–4 включается реверс привода электроцилиндра *12* для выглубления датчика из бурта. Далее процесс повторяется, начиная с участка 4–5. Замеренные значения температуры и влажности сохраняются

в оперативной памяти микропроцессорного блока и по окончании замеров или в режиме реального времени передаются конечному пользователю на стационарный или мобильный ПК в виде массива данных посредством блока передачи данных по радиоканалу. На основе полученного массива данных температуры и влажности зернового бурта в различных его точках строится поверхность распределения этих параметров. На рис. 6 представлены графические фрагменты, отражающие результаты измерений влажности и температуры части слоя зернового бурта.

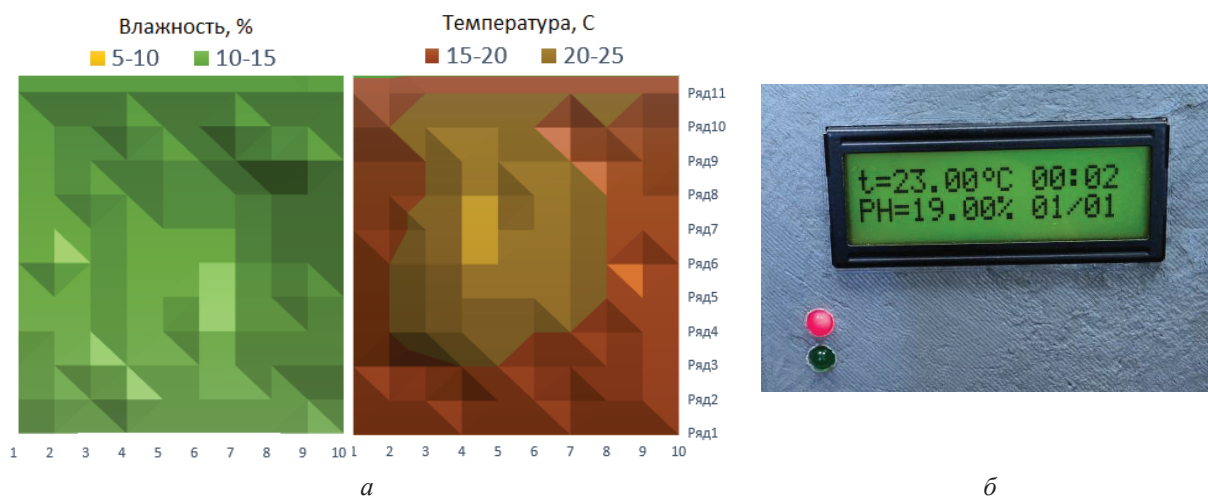


Рис. 6. Фрагмент результатов измерений влажности и температуры зернового вороха в одном слое:
а – графическое представление; б – цифровое представление

Таким образом, предложенная автоматизированная система контроля влажности зерна при хранении гуртовым способом позволяет выполнять контрольные замеры температуры и относительной влажности воздуха одновременно под разным углом и в нескольких местах по всей длине гурта в режиме реального времени.

УДК 681.5

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-63-68

А. А. Федорова, С. А. Васильев, В. В. Алексеев

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАТРОННОГО ПРОФИЛОГРАФА
ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ДАТЧИКА СКАНИРОВАНИЯ
ПО ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ**

Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова
msf68@chuvsu.ru

Приведены математические выкладки, позволяющие сократить время сканирования путем линейного перехода между круговыми траекториями, тривиальными для мехатронного профилографа. Разработаны алгоритм и визуализация перемещения датчика сканирования профилографа по заданной прямолинейной траектории в среде моделирования SimInTech.

Ключевые слова: среда моделирования, сканирование, прямолинейная траектория, датчик сканирования.

A. A. Fedorova, S. A. Vasilyev, V. V. Alekseev

**OPTIMIZATION OF A MECHATRONIC PROFILOGRAPH
BY MOVING THE SCANNING SENSOR ON A STRAIGHT TRAJECTORY**

I. N. Ulyanov Chuvash State University

Mathematical calculations are given that allow to reduce the scanning time by a linear transition between circular trajectories, which are trivial for a mechatronic profiler. An algorithm and visualization of the movement of the profilograph scanning sensor along a given rectilinear trajectory in the SimInTech simulation environment has been developed.

Keywords: modeling environment, scanning, rectilinear trajectory, scanning sensor.

Введение

Автоматизация и роботизация процесса измерений и сканирования позволяет улучшить качество исследования, получить большое количество данных об исследуемых объектах, а также сократить время процесса измерения [1–4]. В зависимости от конкретного применения в измерительном устройстве используется определенная конструкция робота, которая позволяет оптимально решать поставленные задачи [5].

Одной из повседневных задач роботизированных средств измерения является автономное измерение по задаваемым оператором траекториям в штатном режиме. Сократить время перехода от одного режима к другому, в ряде случаев, можно путем отклонения процесса от штатного.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология хранения зерна – температура, условие, срок хранения зерна на складе [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://expert-agro.ru/blog/khranenie-zerna/>, свободный.

2. Пат. № 2555793 Российская Федерация, МПК А01F 25/00. Комплексная система дистанционного мониторинга и диагностики состояния зерна при хранении / М. М. Абдюшев, М. Ю. Соскин, Г. Н. Закладной, Ю. А. Розов ; Открытое акционерное общество «МЕЛЫНВЕСТ». – 2015.

3. Система контроля температуры хранения зерна СКТ-02 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.npp-proma.ru/goods/>, свободный.

ется за счет вращения ходового винта 8, приводимого в движение двигателем 4'. Показатели с датчика 11 и блока управления 7 передаются через Bluetooth-соединение 13, 14 на ноутбук

12, оснащенный системой измерения для согласованной работы электродвигателей в процессе измерения, а также программой приема и обработки показателей датчиков 5 и 11.

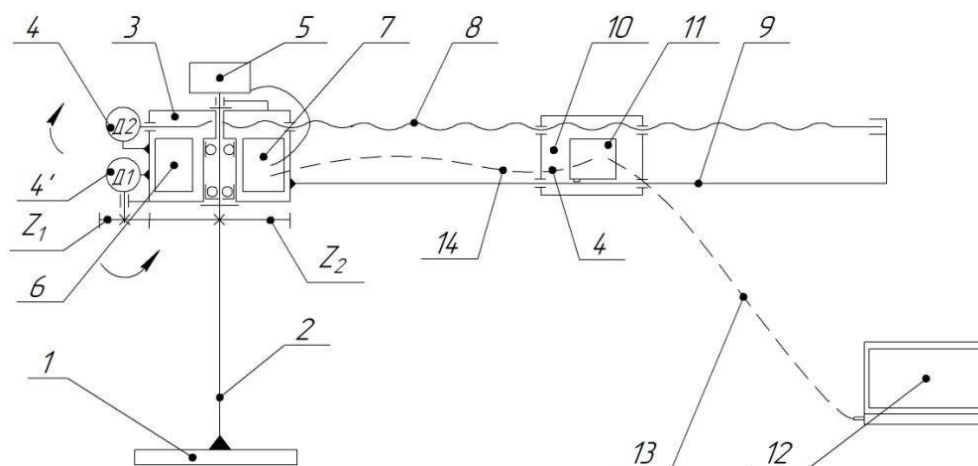


Рис. 1. Схема мехатронного профилографа:

1 – основание; 2 – стойка; 3 – корпус; 4, 4' – двигатели; 5 – угловой датчик (энкодер); 6, 7 – блок питания; 7 – блок управления; 8 – ходовой винт; 9 – направляющая; 10 – каретка; 11 – лазерный датчик положения; 12 – ноутбук; 13, 14 – беспроводные Bluetooth-соединения блока управления с ноутбуком и лазерным датчиком положения соответственно; Z₁ – спутник; Z₂ – опорное колесо

Иногда для оптимизации времени сканирования необходимо переключение в режим сканирования по прямой. Это позволяет сократить время сканирования путем линейного перехода между спиралевидными и круговыми траекториями, тривиальными для разработанного мехатронного профилографа.

Для реализации прямолинейного движения датчика необходимо привести математические выкладки с дальнейшей апробацией, которая требует значительных материальных и человеческих ресурсов при ее выполнении на реальных объектах. В связи с этим рационально использовать математическое представление реальности в среде моделирования с целью экономии материальных ресурсов, уменьшения количества ошибок и обеспечения эффективности труда человека [8, 9].

Целью данной работы является оптимизация мехатронного профилографа перемещением датчика сканирования по прямолинейной траектории. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: приведение математических выкладок перемещения датчика по прямолинейной траектории в мехатронном профилографе; реализация математических формул в выбранной среде моделирования;

разработка алгоритма и визуализация перемещения по заданной траектории.

Методы и материалы

Для реализации в мехатронном профилографе сканирования по прямой линии можно использовать уравнение прямой в полярных координатах (рис. 2):

$$r_i(\varphi) = \frac{l}{\cos(\varphi_i - \alpha)}, \quad (1)$$

где r_i – полярный радиус точки прямой линии, регулируемый приводом Д2; φ_i – полярный угол точки прямой линии, регулируемый приводом Д1; $l(OQ)$ – расстояние от центра координат (полюса) до прямой; α – угол между полярной осью p и нормалью к прямой.

Одним из вариантов исходных входных данных для реализации сканирования по прямой может являться следующий набор: минимальный r_{\min} и максимальный r_{\max} радиусы сканирования; абсциссы и ординаты задаваемых точек M и N отрезка $x_{m(n)}$ и $y_{m(n)}$. При этом r_{\min} и r_{\max} задаются конструктивно; координаты точек M и N задаются в области, ограниченной радиусами сканирования.

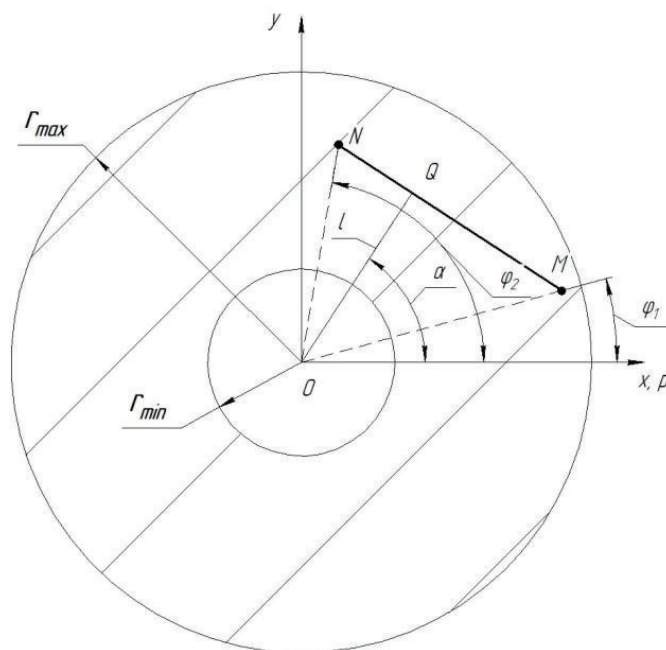


Рис. 2. Прямолинейная траектория сканирования профилографом

Если принять, что первой задаваемой координатой будет абсцисса $x_{m(n)}$, которая принадлежит заданной области:

$$x_{m(n)} \in [-r_{\max}; r_{\max}], \quad (2)$$

то при этом ордината будет принадлежать области:

$$y_{m(n)} \in [-\sqrt{r_{\max}^2 - x_i^2}; \sqrt{r_{\max}^2 - x_i^2}], \quad (3)$$

Кроме этого, если абсцисса точек лежит в заданных пределах:

$$x_{m(n)} \in [-r_{\min}; r_{\min}], \quad (4)$$

то не может принимать значения в следующей области:

$$y_{m(n)} \notin [-\sqrt{r_{\min}^2 - x_i^2}; \sqrt{r_{\min}^2 - x_i^2}], \quad (5)$$

Принято допущение о том, что сканирование реализуется против часовой стрелки и точки M и N задаются таким образом, что полярный угол до точки M φ_1 меньше полярного угла до точки N φ_2 .

Полярные углы φ_1 и φ_2 определяются по формуле

$$\varphi_{1(2)} = \arctan \frac{y_{m(n)}}{x_{m(n)}} + k\pi. \quad (6)$$

Коэффициент k в зависимости от положе-

ния точек принимает следующие значения:

- $[0; \pi/2]$: $k = 0$;
- $[\pi/2; 3/2\pi]$: $k = 1$;
- $[3\pi/2; 2\pi]$: $k = 2$.

При этом углы ограничены одним оборотом $\varphi_i \in [0, 2\pi]$.

Для реализации движения по прямой (1) в полярных координатах были определены расстояние l и угол α из уравнения прямой NM ,

с угловым коэффициентом $k = \frac{y_m - y_n}{x_m - x_n}$.

$$\alpha = \arctan \left(-\frac{x_m - x_n}{y_m - y_n} \right) + k\pi. \quad (7)$$

Используя классическую формулу для расстояния от центра координат до прямой l , получаем:

$$l = \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \frac{\left| -\frac{y_m - y_n}{x_m - x_n} x_n + y_m \right|}{\sqrt{\left(\frac{y_m - y_n}{x_m - x_n} \right)^2 + 1}}. \quad (8)$$

С учетом вышеизложенного, возвращаясь к формуле (1), было получено:

$$r_i(\varphi) = \frac{\left| -\frac{y_m - y_n}{x_m - x_n} x_n + y_m \right|}{\cos \left(\varphi_i - \arctan \left(-\frac{x_m - x_n}{y_m - y_n} \right) \right) \sqrt{\left(\frac{y_m - y_n}{x_m - x_n} \right)^2 + 1}}, \quad (9)$$

Результаты и обсуждение

Для реализации модели выбрана среда моделирования SimInTech, которая в настоящее время является одной из перспективных средств моделирования и разработки робототехнических и иных сложных систем. Для реализации математических выкладок принята структура, представляющая собой совокупность двух модулей, взаимосвязанных между собой через базу сигналов: модуль управ-

ления сканированием и панель управления.

Панель управления представляет собой блок анимации, который содержит три подблока, состоящих из шести примитивов текстового редактора для введения исходных данных, шести примитивов текста для отображения динамически изменяющихся числовых значений пределов областей координат точек, и полярного графика реализуемого прямолинейного движения по заданным координатам (рис. 3).

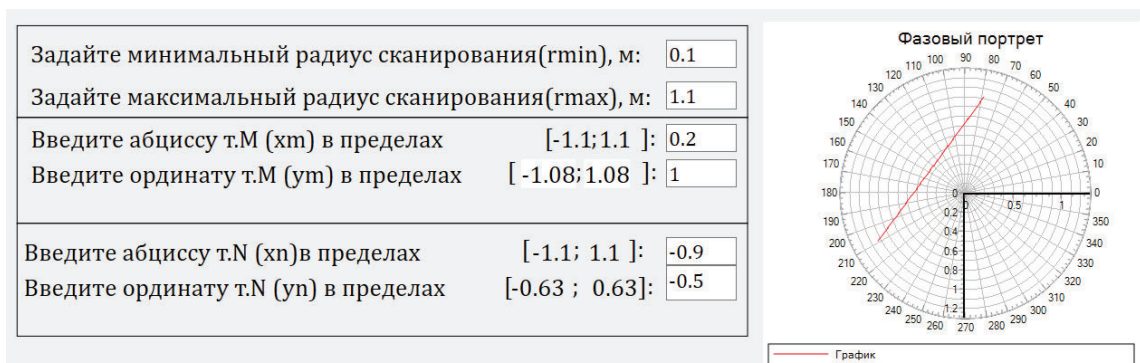


Рис. 3. Панель управления для задания исходных данных

В первом блоке вводятся исходные данные устройства, во втором и третьем – координаты исходных точек в пределах допустимых значений, согласно формулам (2) и (3). При этом допустимые значения координат меняются в режиме реального времени. Если же координата x_i принадлежит области согласно (4), то отображается дополнительный примитив текста, где указывается область согласно (5).

Скрипт, отвечающий за функционирование панели управления посредством вычисления допустимых значений координат отрезка, создан в окне анимации. Модуль управления дви-

жением реализована в схеме модели общего вида. Расчет полярного радиуса реализована с помощью блоков из «Библиотеки блоков» и скрипта в схеме модели общего вида.

В скрипте модели общего вида также реализовано вычисление угла α , полярных углов точек M и N прямой согласно (6) и (7) соответственно в зависимости от положения точек и исключение деления на ноль при нулевых значениях абсцисс точек M и N . Область значений полярных углов от 0 до 2π задана с помощью модельного времени $Time$.

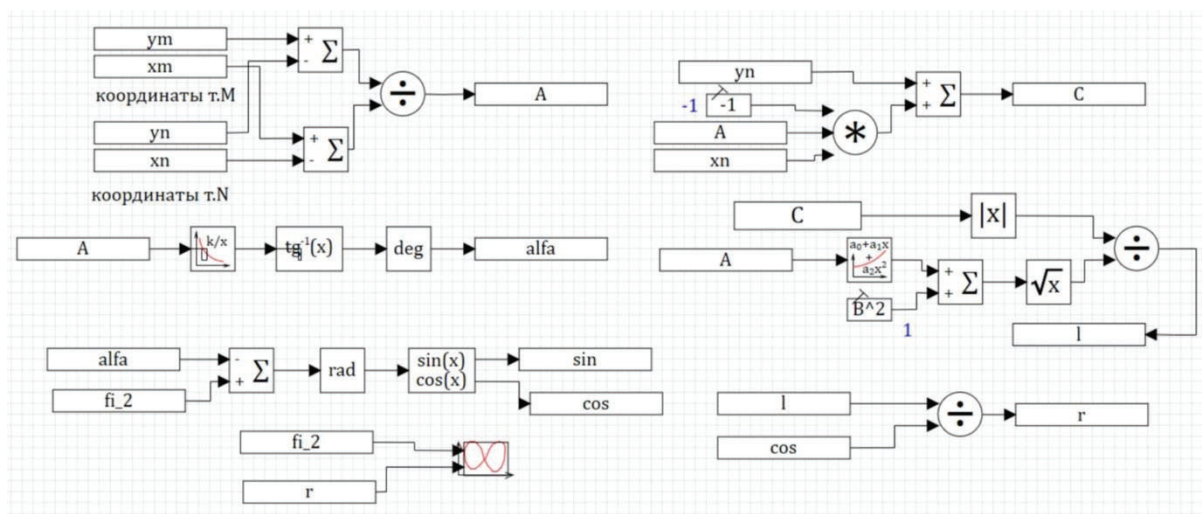


Рис. 4. Схема модели общего вида

Расчет полярного радиуса в зависимости от полярного угла выполнен с помощью блоков на схеме модели общего вида (рис. 4). Основные значения переменных, определяемые по формулам (8) и (9), записываются в базу данных, которая позволяет применять любой сигнал в схеме в другой части, не загромождая при этом проект, а также для синхронного обмена данными между модулями проекта.

Для разработанного мехатронного профилографа, с минимальным максимальным радиусом сканирования $r_{\min} = 0,15$ м, $r_{\max} = 1,20$ м (рис. 5), были получены графики перемещения датчика по прямой при различных положениях исходных координат задаваемых точек. Приведены результаты моделирования перемещения датчика по прямой линии при положениях точек M и N : $\varphi_1 \in [0; \pi/2]$, $\varphi_2 \in [0; \pi/2]$ – рис. 6, *a*; $\varphi_1 \in [\pi/2; \pi]$, $\varphi_2 \in [\pi; 3\pi/2]$ – рис. 6, *б*;

$\varphi_1 \in [0; \pi/2]$, $\varphi_2 \in [\pi/2; \pi]$ – рис. 6, *в*;
 $\varphi_1 \in [0; \pi/2]$, $\varphi_2 \in [3\pi/2; 2\pi]$ – рис. 6, *г*;
 $\varphi_1 \in [\pi; 3\pi/2]$, $\varphi_2 \in [3\pi/2; 2\pi]$ – рис. 6, *д*;
 $\varphi_1 \in [\pi/2; \pi]$, $\varphi_2 \in [3\pi/2; 2\pi]$ – рис. 6, *е*.

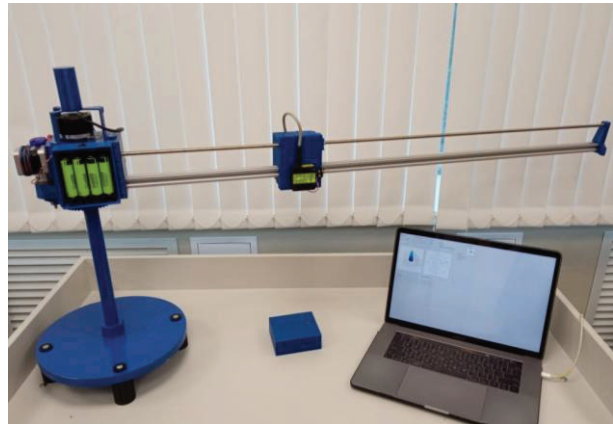


Рис. 5. Внешний вид мехатронного профилографа

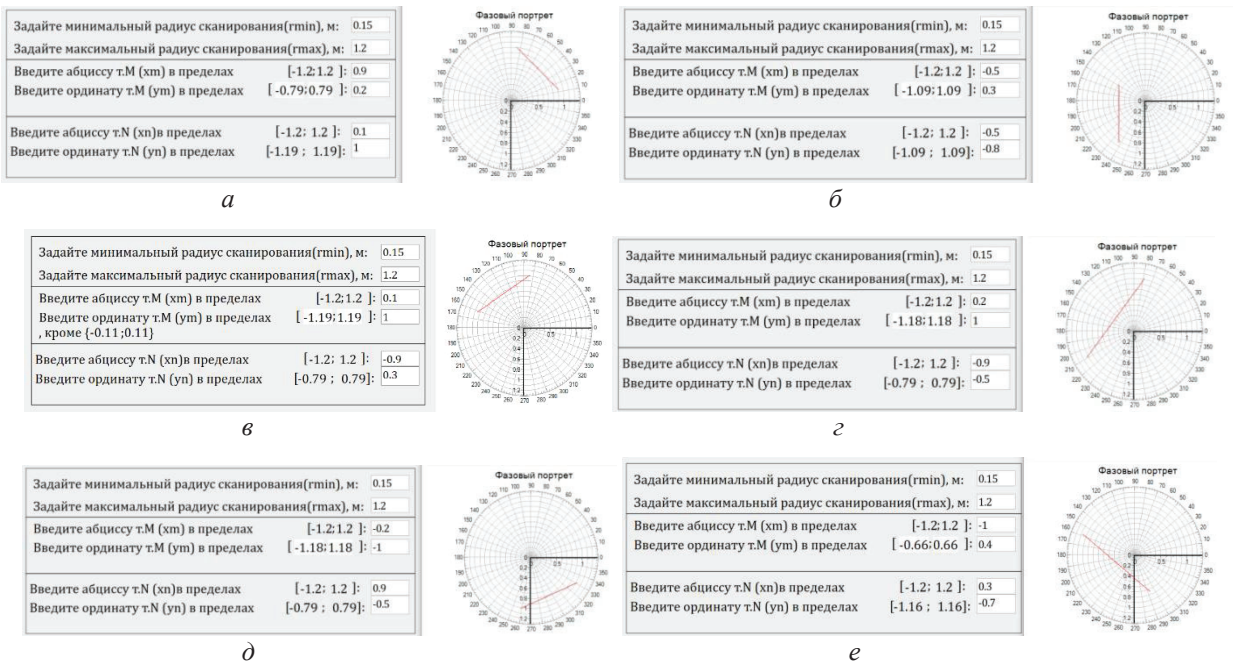


Рис. 6. Результаты моделирования перемещения датчика по прямолинейной траектории с координатами исходных точек:

a – $M(0,9;0,2)$, $N(0,1;1)$; *б* – $M(-0,5;0,3)$, $N(-0,5;-0,8)$; *в* – $M(0,1;1)$, $N(-0,9;0,3)$; *г* – $M(0,2;1)$, $N(-0,9;-0,5)$;
д – $M(-0,2;-1)$, $N(0,9;-0,5)$; *е* – $M(-1;0,4)$, $N(0,3;-0,7)$

Моделирование перемещения датчика по прямолинейной траектории с применением SimInTech подтверждает правильность приведенных математических выкладок и позволяет провести дальнейшую апробацию на реальном объекте с экономией материальных ресурсов и уменьшения количества ошибок, обеспечивая эффективность труда человека.

Выводы

В ходе работы была проведена оптимизация мехатронного профилографа путем отклонения процесса сканирования от штатного режима. В работе приведены математические выкладки, позволяющие сократить время сканирования путем линейного перехода между спиралевидными и круговыми траекториями, тривиальными

ми для разработанного мехатронного профилографа, состоящего из винтового и зубчатого механизмов, синхронизирующих радиальное смещение с вращательным движением. Реализация математических формул выполнена в среде моделирования SimInTech, в которой разработан алгоритм и визуализация сканирования профилографом по заданной прямолинейной траектории в графике с полярными координатами. Моделирование с применением SimInTech позволило проверить правильность проведенных расчетов и позволит уменьшить количество ошибок в дальнейшей апробации на реальном объекте. Апробированные в среде моделирования формулы можно использовать в роботизированных устройствах с аналогичной конструкцией с другими массо-габаритными характеристиками для сканирования объектов по прямолинейной траектории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Донсков, А. В. Автоматизированная система контроля состояния космического аппарата / А. В. Донсков, Н. В. Мишурова, С. В. Соловьев // Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т. 25, № 3. – С. 151–160.
2. Марков, А. В. Концепция прецизионных автоматизированных систем контроля датчиков давления как средств метрологического обеспечения летательных аппаратов / А. В. Марков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2018. – № 9–10. – С. 150–154.
3. Юсупов Р. Х. Аналитический обзор роботизированных технологических процессов агропромышленного комплекса / Р. Х. Юсупов, Д. В. Иванов // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2018. – № 8. – С. 63–71.
4. Внедрение интеллектуальных роботизированных систем в производственные процессы судостроительного предприятия / М. А. Горькавый, А. И. Горькавый, А. С. Гудим, М. А. Мельниченко, В. П. Егорова // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2, № 2. – С. 97–104.
5. Федорова, А. А. Обзор роботизированных средств измерения геометрических параметров / А. А. Федорова, И. Н. Иванов, С. А. Васильев // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2022. – Т. 9, № 3–4. – С. 35–40.
6. Пат. 2724386 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/24. Мехатронный профилограф / С. А. Васильев, Р. И. Александров, А. А. Федорова [и др.] ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова». – 2020.
7. Пат. 2770800 С1 Российская Федерация, МПК G01B 5/20, G01B 5/28. Полевой мехатронный профилограф / С. А. Васильев, Р. И. Александров, А. А. Федорова [и др.] ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова». – 2022.
8. Моделирование технологического процесса в среде визуального моделирования SimInTech / И. Н. Пожаркова, А. В. Чубарь, И. А. Грищенко, Е. Ю. Трояк // Научно-аналитический журнал «Сибирский пожарно-спасательный вестник». – 2018. – № 2. – С. 29–37.
9. Бартнев, В. В. Математическая модель движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами по горизонтальной плоскости / В. В. Бартнев, С. Ф. Яцун, А. С. Аль-Еззи // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 288–293.

УДК 007.52 + 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-68-72

А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин

ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ ТРЕХОПОРНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ*

Волгоградский государственный технический университет

Aram-081097@mail.ru, dtm@vstu.ru

Предложена расчетная схема и математическая модель трехопорной робототехнической системы, предназначенной для перемещения по вертикальной плоскости за счет управления величиной и направлением усилия, развиваемого актуатором. Решена задача динамики мобильного робота, прижатие которого к рабочей поверхности осуществляется за счет внешнего усилия. Получены уравнения движения центра масс мобильного робота.

Ключевые слова: мобильные робототехнические средства, перемещение, математическая модель, задача динамики, вертикальная плоскость.

© Хачатрян А. А., Брискин Е. С., 2023.

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

A. A. Khachatryan, E. S. Briskin

ON THE CONTROL OF A THREE-SUPPORT MOBILE ROBOT ON A VERTICAL PLANE

Volgograd State Technical University

The design scheme and mathematical model of a three-support robotic system designed to move on a vertical plane by controlling the magnitude and direction of the force developed by the actuator is presented in this article. The task of the dynamics of a mobile robot is solved, the pressing of which to the working surface is carried out due to external force. The equations of motion of the center of mass of the mobile robot are obtained.

Keywords: mobile robotics, displacement, mathematical model, the task of dynamics, vertical plane.

Введение

Роботы для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям имеют ряд актуальных применений, включая обслуживание и обследование зданий и сооружений; выполнение технологических операций на труднодоступных поверхностях, исключая в том числе присутствие человека. Под произвольно ориентированными поверхностями понимается относительно ровная поверхность, расположенная под углом от 0 до 90° к горизонту.

В целом роботы для перемещения по вертикальным стенам могут повысить безопасность и эффективность работ на высоте, а также снизить риски для человеческой жизни.

Известны разработки роботов, предназначенных для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям за счет электромагнитного взаимодействия, вакуумных устройств, тросовых движителей и адгезии [1–5]. Рассматривается робот, опирающийся на обрабатываемую поверхность за счет прижатия

к ней «толкающим» движителем, который может быть выполнен с использованием одноопорного механизма [6–7], и в котором за счет работы одного линейного привода осуществляется реализация усилия «прижатия» робота к обрабатываемой поверхности.

1. Постановка задачи

Ставится задача определения перемещения центра масс мобильного робота и его ориентации при известном выдвигании штока линейного привода (актуатора) и усилия, развиваемого актуатором для обеспечения требуемого перемещения.

2. Расчетная схема робототехнической системы с одной опорой на горизонтальную плоскость

Расчетная схема рассматриваемой робототехнической системы с одной опорой представлена на рис. 1, а. Рассматривается движение робототехнической системы, которая состоит из робота 1, представленного на рисунке характерной поверхностью S, перемещающегося по рабочей

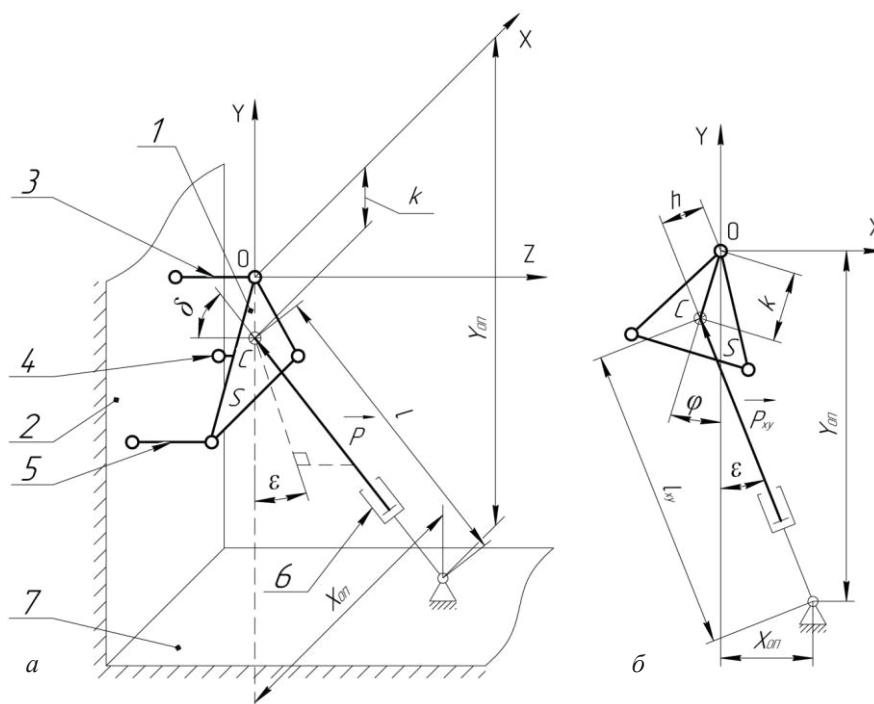


Рис. 1. Расчетная схема робота с прижимным механизмом: а – общий вид робототехнической системы; б – проекция робототехнической системы на плоскость XOY

поверхности 2, опираясь на нее тремя опорами 3–5, за счет приложенного со стороны актуатора 6 усилия P . Актуатор при этом закреплен на опорной поверхности 7. Изучается вращательное движение мобильного робота вокруг оси Z за счет торможения опоры 3 при расторможенных остальных опорах и воздействия усилием P со стороны актуатора на мобильный робот.

При описании расчетной схемы использованы следующие обозначения: C – центр масс робота; k – расстояние от начала координаты (от опоры 3) до центра масс робота; $x_{\text{оп}}, y_{\text{оп}}$ – соответственно координаты основания одноопорного механизма 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 начала координат, совпадающего с опорой 3; l – длина линейного привода одноопорного механизма; l_{xy} – проекция линейного привода одноопорного механизма на плоскость XOY ; P_{xy} – проекция усилия P на плоскость XOY ; h – расстояние от оси вращения до линии действия силы P в плоскости XOY .

3. Метод решения

Принимается, что усилие прижатия P обеспечивает вращательное движение робота вокруг неподвижной опоры 3; при этом силами трения между опорами 4, 5 и рабочей поверхностью пренебрегается. Уравнение вращательного движения в дифференциальной форме представим в виде:

$$I_z \ddot{\phi} = M_z, \quad (1)$$

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

$$M_z = P_{xy} h. \quad (2)$$

Для решения поставленной задачи задаемся законом движения мобильного робота по произвольно ориентированной поверхности (зависимостью изменения угла поворота мобильного робота вокруг начала координат, совпадающего с опорой 3, от времени в вертикальной плоскости XOY):

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

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 следующим образом:

$$\begin{cases} x_C = -k \sin \phi; \\ y_C = -k \cos \phi. \end{cases} \quad (4)$$

Зависимость длины линейного привода от времени можно задать выражением

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

При этом уравнение прямой, совпадающей с осью линейного привода одноопорного механизма, вдоль которой действует усилие актуатора P , определяется следующей зависимостью:

$$xA + yB + C = 0, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A &= (y_C - y_{\text{оп}}), \\ B &= (x_{\text{оп}} - x_C), \end{aligned} \quad (7)$$

$$C = y_{\text{оп}}(x_C - x_{\text{оп}}) - x_{\text{оп}}(y_C - y_{\text{оп}}).$$

Для нахождения расстояния h от оси вращения до линии действия силы P воспользуемся следующим выражением:

$$h = \frac{|Ax_O + By_O + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (8)$$

где x_O, y_O – координаты точки O , вокруг которой происходит вращение мобильного робота (рис. 1, б).

Таким образом, получены все необходимые зависимости для решения дифференциального уравнения вращательного движения мобильного робота (1).

4. Имитационное моделирование

Для решения уравнения (1) и определения направления действия и величины усилия актуатора задаются необходимые массово-геометрические параметры робототехнической системы, начальные и граничные условия при движении мобильного робота по рабочей поверхности (см. таблицу ниже).

Исходные данные для имитационного моделирования

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

Для указанных начальных и граничных условий получена зависимость угла поворота мобильного робота вокруг начала координат от времени:

$$\varphi = -\frac{\pi}{\tau^3} t^3 + \frac{3\pi}{2\tau^2} t^2. \quad (9)$$

Для определения перемещения мобильного робота по рабочей поверхности, а также его ориентации на ней, получены соответственно графики зависимости координат его центра масс x_c и y_c и угла поворота мобильного робота вокруг начала координат от длины l линейного привода одноопорного механизма (рис. 2, 3).

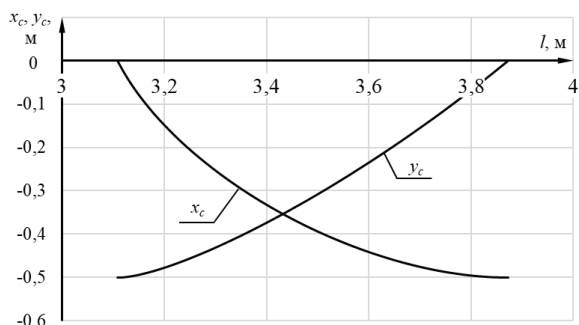


Рис. 2. График зависимости координат центра масс мобильного робота от длины линейного привода одноопорного механизма

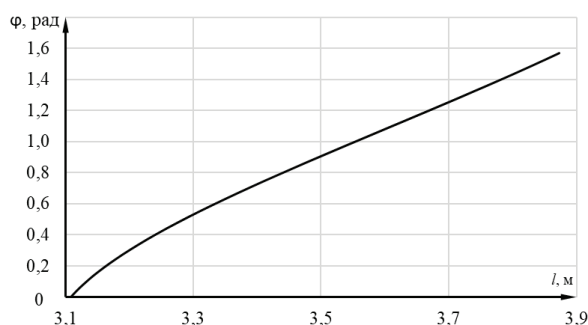


Рис. 3. График зависимости угла поворота мобильного робота вокруг начала координат от длины линейного привода одноопорного механизма

Для обеспечения требуемого перемещения мобильного робота вычислены значения усилия, возникающего на штоке линейного привода одноопорного механизма и получен график

зависимости указанного усилия от длины линейного привода одноопорного механизма, показанный на рис. 4.

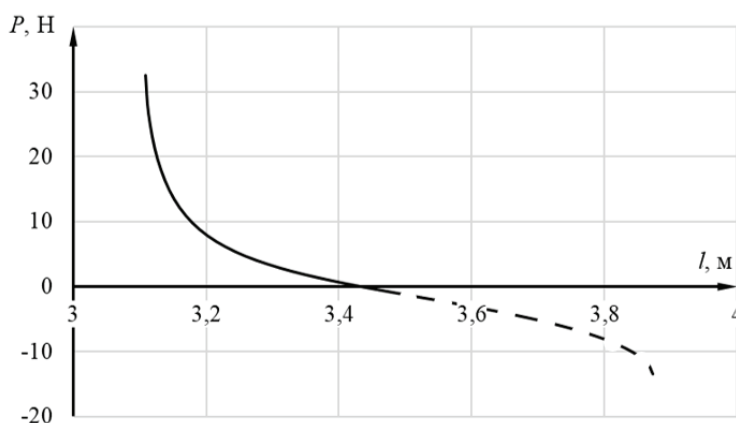


Рис. 4. График зависимости усилия, возникающего на штоке линейного привода одноопорного механизма, от длины линейного привода одноопорного механизма

Выполненные расчеты позволили получить диапазон изменения длины линейного привода одноопорного механизма l от 3,1 до 3,8 м. Уд-

линение линейного привода составило 0,7 м. При этом максимальное значение усилия P составило 32,6 Н.

Однако при удлинении штока более 0,35 м усилие P принимает отрицательные значения (штриховая часть графика на рис. 4). При этом изменяется направление действия усилия актуатора, а реакции опор мобильного робота принимают отрицательные значения. Это приводит к потере работоспособности робототехнической системы, заключающейся в «отрыве» мобильного робота от произвольно ориентированной поверхности.

Выводы

Решена задача динамики мобильного робота, прижатие которого к рабочей поверхности осуществляется за счет внешнего усилия:

- получены уравнения движения центра масс мобильного робота;

- определена ориентация робота на рабочей поверхности при известном выдвигании штока актуатора;

- вычислено усилие, развиваемое актуатором, необходимое для обеспечения требуемого перемещения.

Для обеспечения работоспособности (исключения «отрыва») мобильного робота во время движения по рабочей поверхности необходимо включить в конструкцию робототехнической системы дополнительную опору на горизонтальную поверхность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Градецкий, В. Г. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 1 (2). – С. 9–16.
2. Silva, Manuel & Tenreiro Machado, José. A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion. 10.5772/8826. – 2010.
3. Хачатрян, А. А. Мобильные робототехнические системы, перемещающиеся по произвольно ориентированным поверхностям: основные недостатки, достоинства, перспективы использования / А. А. Хачатрян // Известия ВолГГУ : научный журнал № 4 (263) / ВолГГУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 57–64.
4. Побегайлов, О. А. Мобильные роботы вертикального перемещения / О. А. Побегайлов, И. В. Кравченко, С. О. Кожуховский // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 4 (14). – С. 85–95.
5. Xiao, J. City Climber: a new generation of mobile robot with wall-climbing capability / J. Xiao, W. Morris, N. Chakravarthy, A. Calle // Proc. of the SPIE, 2006. – Vol. 6230.
6. Хачатрян, А. А. О перемещении трехопорного мобильного робота по произвольно ориентированной поверхности / А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин // Известия ВолГГУ : научный журнал № 4 (275) / ВолГГУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 89–95.
7. Хачатрян, А. А. О перемещении мобильного робота по произвольно ориентированным поверхностям / А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин // Известия ВолГГУ : научный журнал № 9 (268) / ВолГГУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 86–93.

УДК 629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-72-76

**В. В. Чернышев¹, И. П. Вершинина¹, А. Х. Насари Задеган¹
В. Е. Пряничников², М. Д. Соловьева², Д. К. Степанова²**

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА НОГ В ДВИЖИТЕЛЕ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ НАГРУЖЕННОСТЬ ПРИВОДА ШАГАЮЩИХ МАШИН С МЕХАНИЗМАМИ ШАГАНИЯ ЦИКЛОВОГО ТИПА *

¹Волгоградский государственный технический университет

²Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

dtm@vstu.ru

Рассматриваются результаты моделирования динамики шагающих машин «тяжелой» весовой категории с движителями циклового типа. Выясняется влияние числа ног (механизмов шагания) в движителе на структуру затрат мощности, расходуемых на движение. Показано, что увеличение числа ног в движителе, несмотря на очевидный рост его инерционных характеристик, приводит к снижению динамической нагруженности привода шагающих машин.

Ключевые слова: мобильные роботы, шагающий движитель, цикловые механизмы шагания, динамика привода, математическое моделирование.

© Чернышев В. В., Вершинина И. П., Насари Задеган А. Х., Пряничников В. Е., Соловьева М. Д., Степанова Д. К., 2023.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00720, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00720/>.

V. V. Chernyshev¹, I. P. Vershinina¹, A. H. Nasari Zadegan¹
V. E. Pryanichnikov², M. D. Soloveva², D. K. Stepanova²

INFLUENCE OF THE NUMBER OF LEGS IN THE MOVER
ON THE DYNAMIC LOADING OF THE DRIVE OF WALKING
MACHINES WITH CYCLIC TYPE WALKING MECHANISMS

¹Volgograd State Technical University
²Keldysh Institute of Applied Mathematics

The results of modeling the dynamics of walking machines of the "heavy" weight category with cyclic type propellers are considered. The influence of the number of legs (walking mechanisms) in the mover on the structure of power costs spent on movement is revealed. It is shown that an increase in the number of legs in the propulsion system, despite the obvious increase in its inertial characteristics, leads to a decrease in the dynamic load of the drive of walking machines.

Keywords: mobile robots, walking mover, cyclic walking mechanisms, drive dynamics, mathematical modeling.

Шагающие машины и роботы, в сравнении с традиционными колесными и гусеничными машинами, обладают лучшей грунтовой и профильной проходимостью [1–3]. С другой стороны, шагающий способ передвижения требует дополнительных энергозатрат на преодоление цикловых сил инерции в системе и на вертикальные колебания корпуса при каждом шаге. Указанный недостаток особенно характерен для шагающих машин с движителями, построенными на базе простейших цикловых механизмов шагания, так как они, как правило, не могут обеспечить горизонтальный опорный участок траектории с равномерным движением опорной точки. В работе исследовано влияние числа ног (механизмов шагания) в движителе на динамическую нагруженность привода шагающих машин «тяжелой» весовой категории. Под шагающими движителями понимается группа (не менее двух) кинематически связанных механизмов шагания (ног), которые периодически взаимодействуют с грунтом, обеспечивая чередование опорной фазы и фазы переноса. Увеличение числа ног в движителе приводит к снижению неравномерности курсового движения машины и уменьшению колебаний ее корпуса. С другой стороны, имеет место рост энергозатрат на преодоление сил инерции в движителе при каждом шаге из-за увеличения его массы.

Анализ базируется на результатах теоретических исследований и полевых испытаний 5-тонных шагающих робототехнических комплексов «Восьминог» и «Восьминог-М» [4], предназначенных для работы на слабонесущих грунтах, а также опытных образцов шагающих

опор дождевальная машины «Кубань» [5]. Существование реальных образцов шагающих машин с известными кинематическими и инерционными характеристиками движителя существенно облегчило проведение анализа.

В шагающих машинах использовались 4-звенные одностепенные цикловые механизмы шагания «λ-образного» типа [6]. Механизм предложен Н. В. Умновым (ИМАШ РАН им. А. А. Благодирова). Движитель состоит из двух механизмов шагания, кинематически жестко связанных и работающих в противофазе. В каждый момент времени хотя бы один из механизмов находится в контакте с грунтом, что позволяет не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключает необходимость управляемой системы адаптации. В результате машины имеют минимальное число управляемых степеней свободы и становятся существенно проще аналогов с адаптивным управлением.

Схема механизма шагания и траектория его опорной точки C в относительном движении представлена на рис. 1. Точки на траектории расположены через равные промежутки времени – через $1/24$ периода цикла. Точки с заливкой соответствуют опорной фазе. Нулевая точка траектории соответствует нулевому углу поворота ведущего кривошипа механизма шагания ($\varphi_1 = 0$).

Увеличение числа ног в движителе приводит к уменьшению длины опорной части траектории и позволяет использовать в качестве опорного участка практически горизонтальную нижнюю часть траектории с равномерным движением опорной точки (рис. 1, в).

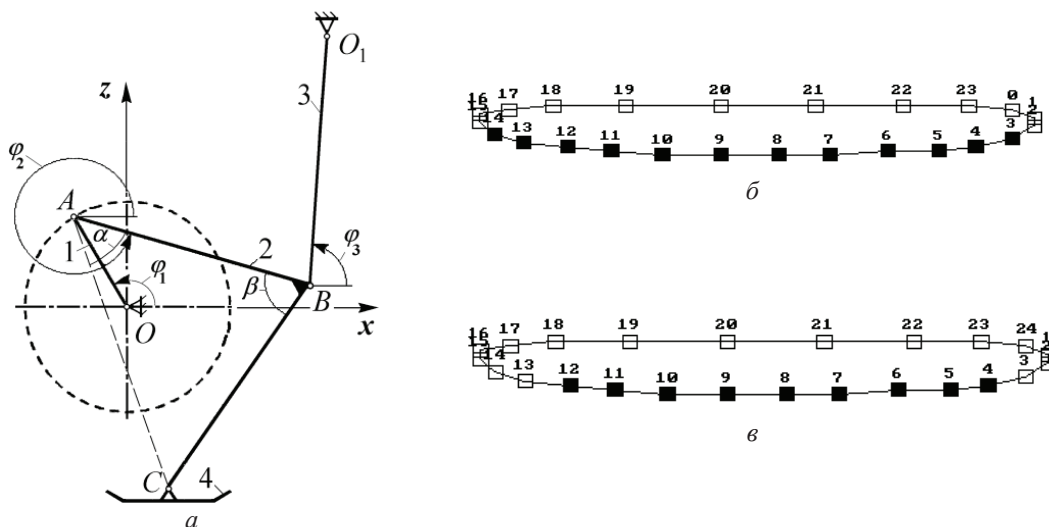


Рис. 1. Схема механизма шагания (а) и закон движения его опорной точки по траектории в относительном движении при двух (б) и трех (в) механизмах шагания в движителе:
1 – ведущий кривошип; 2 – Г-образное опорное звено (шатуны); 3 – коромысло; 4 – стопа

Несовершенство траектории опорной точки механизмов шагания приводит к неравномерности курсового движения и вертикальным колебаниям корпуса в каждом цикле (шаге). Это требует дополнительных затрат мощности привода. Они складываются из мощности W_0^G , затрачиваемой на преодоление силы тяжести при вертикальных колебаниях ее корпуса; мощности W_0^Φ , идущей на преодоление цикловых сил инерции корпуса, а также суммарных затрат мощности $W_{дв}^\Phi$ на преодоление сил инерции в звеньях движителя, которые также носят периодический характер.

Мощность, необходимая на преодоление силы тяжести при колебаниях корпуса шагающей машины, равна

$$W_0^G = Gv_z, \quad (1)$$

где G – вес машины; v_z – вертикальная составляющая скорости корпуса.

Мощность, идущая на преодоление сил инерции корпуса, равна

$$W_{0x}^\Phi = \Phi_{0x}v_x + \Phi_{0z}v_z, \quad (2)$$

где $\Phi_{0x} = -m_0 a_x$, $\Phi_{0z} = -m_0 a_z$ – курсовая и вертикальная составляющие главного вектора сил инерции шагающей машины (без учета движителей); a_x , a_z – курсовая и вертикальная составляющие ускорения шагающей опоры, соответственно.

Мощность, расходуемая на преодоление цикловых сил инерции в движителе, складывается из затрат мощности на преодоление сил инерции в звеньях 4-звенных механизмов шагания:

$$W_{дв}^\Phi = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^2 (\Phi_{ijkx} \dot{x}_{Cijk} + \Phi_{ijkz} \dot{z}_{Cijk} + M_{ijy}^\Phi \omega_{ijy}), \quad (3)$$

где Φ_{ijkx} , Φ_{ijkz} – курсовая и вертикальная составляющие силы инерции i -го звена ($i = 1, 2, 3, 4$) j -го механизма шагания ($j = 1, 2, \dots, n$) k -го борта ($k = 1, 2$); \dot{x}_{Cijk} , \dot{z}_{Cijk} – курсовая и вертикальная составляющие скорости центра масс звеньев; M_{ijy}^Φ и ω_{ijy} – момент сил инерции звена и его угловая скорость в плоскости шагания.

Проекции сил инерции и момент сил инерции звеньев механизмов шагания равны, соответственно: $\Phi_{ijkx} = -m_i \ddot{x}_{Cijk}$, $\Phi_{ijkz} = -m_i \ddot{z}_{Cijk}$, $M_{ijk}^\Phi = -J_{Ci} \ddot{\phi}_{ijk}$, где m_i и J_{Ci} – масса и момент инерции звена; \ddot{x}_{Cijk} , \ddot{z}_{Cijk} – курсовая и вертикальная составляющие ускорения центра масс звена в плоскости шагания; $\ddot{\phi}_{ijk}$ – угловое ускорение звена.

Для определения составляющих дополнительной мощности (1)–(3) был проведен полный кинематический анализ движения механизмов шагания движителя. При определении скоростей и ускорений узловых точек механизмов шагания они рассматривались как плоские многозвенные механизмы. При составлении дифференциальных уравнений движения звеньев их угловые скорости выражались через скорости точек, на которые накладываются внешние связи [7]. Выражения для скоростей узловых точек получались последовательным рас-

смотрением движений звеньев механизма. Угловые ускорения звеньев движителя определялись дифференцированием их угловых скоростей. Для задания движения корпуса шагающей машины к уравнениям движения также добавлялись формулы для проекций относительных скоростей опорных точек, являющихся узловыми точками опорного звена, а также формулы для относительных координат опорных точек, необходимых для определения момента смены стоп.

В процессе анализа были рассмотрены слу-

чай движения машины с двумя, тремя и четырьмя механизмами шагания в движителе, расположенными, соответственно, со сдвигом по фазе на 1/2, 1/3 и 1/4 оборота ведущего кривошипа. Структура дополнительных энергозатрат робота «Восьминог» с базовыми движителями и лыжеобразными стопами при равномерном вращении ведущего кривошипа при средней скорости передвижения 5 км/ч представлена на рис. 2. Указанная скорость близка к предельной реально реализуемой скорости для рассматриваемого мобильного робота.

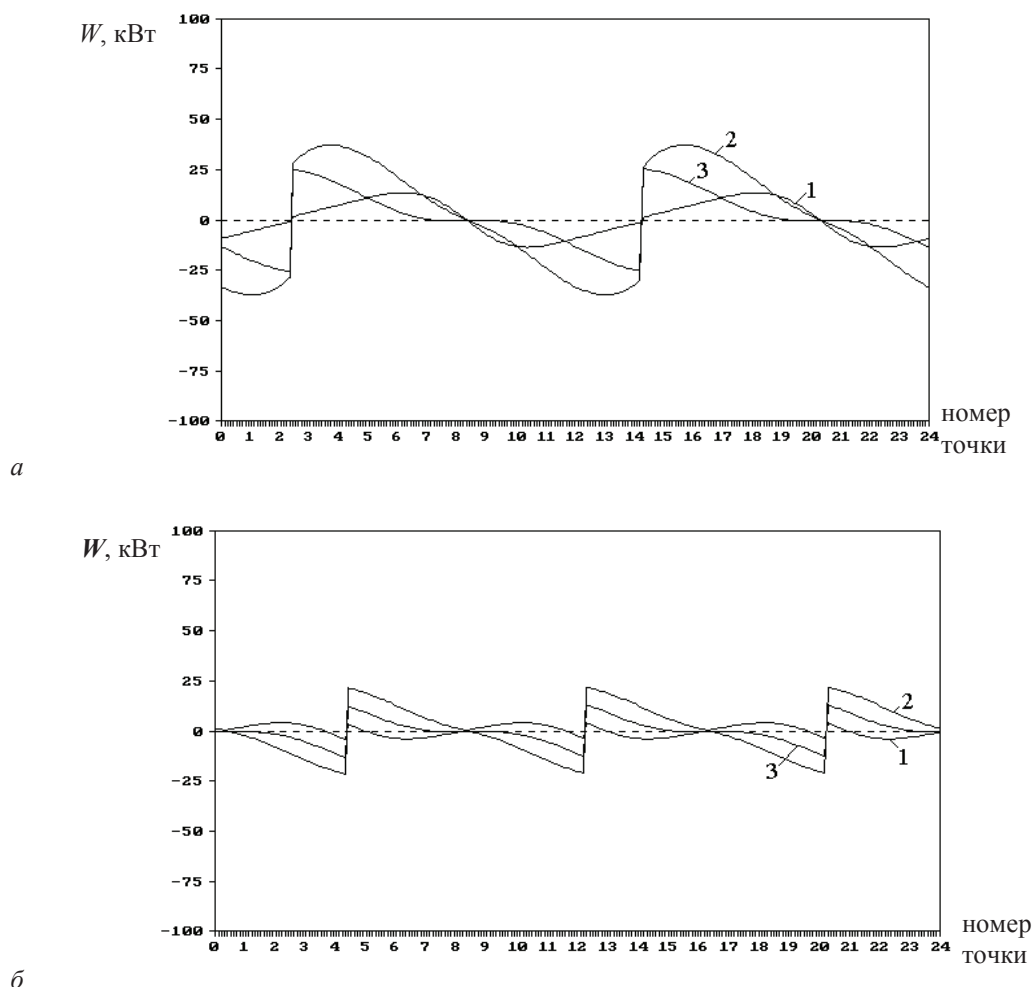


Рис. 2. Структура дополнительных затрат мощности шагающей машины с базовыми движителями (а) и с трехногими движителями (б) при средней курсовой скорости 5 км/ч:
 $W_{ос}^Ф$ (кривая 1); $W_0^Ф$ (кривая 2); W_0^G (кривая 3)

Основной вклад в дополнительные затраты мощности на движение в случае двухногого движителя при рассматриваемой скорости передвижения вносит мощность $W_0^Ф$, затрачиваемая на преодоление сил инерции корпуса (рис. 2, а). Несколько ей уступает мощность W_0^G , расходуемая на преодоление силы тяже-

сти при вертикальных колебаниях корпуса машины. Затраты на преодоление сил инерции в движителе $W_{ос}^Ф$ в рассматриваемом случае вносят наименьший вклад в суммарную мощность. Положения максимальных значений основных составляющих затрат мощности $W_0^Ф$ и W_0^G совпадают. В результате зависимость суммар-

ных затрат мощности носит скачкообразный характер. Такое изменение энергозатрат требует необоснованного увеличения мощности силовой установки. Причем в системе возможна лишь частичная рекуперация энергии – она теряется при ударном взаимодействии стоп с грунтом при их смене и по другим причинам. В шагающей машине «Восьминог», в частности, рекуперации энергии в системе при бортовой скорости $v_{kz} < 0$ не происходит из-за включенной в состав бортового редуктора самотормозящейся передачи, обеспечивающей статическую устойчивость машины при неработающем силовом приводе.

Увеличение числа ног в движителе приводит к снижению неравномерности курсового движения машины и уменьшению колебаний ее корпуса. При трехногем движителе наибольший вклад в дополнительные энергозатраты вносит мощность W_0^{Φ} , идущая на преодоление сил инерции корпуса (рис. 2, б). Мощность W_0^G , расходуемая на преодоление силы тяжести при колебаниях корпуса, существенно ей уступает. Максимальные значения W_0^{Φ} и W_0^G , в сравнении с базовой машиной, уменьшаются практически вдвое. Затраты $W_{ос}^{\Phi}$ на силы инерции в движителе наименее значимы. За счет этого суммарные энергозатраты на колебания в системе снижаются почти в 2 раза. Максимальные значения мощностей W_0^{Φ} и W_0^G , как видно из рис. 2, б, совпадают. Максимум $W_{ос}^{\Phi}$ смещен по времени и расположен в противофазе по отношению к W_0^{Φ} и W_0^G . В результате имеет место их взаимная частичная компенсация почти в течение всего цикла. Правда, из-за малости $W_{ос}^{\Phi}$ она незначительна и временная зависимость мощности, требуемой на движение, продолжает носить нежелательный скачкообразный характер. В случае четырехногих движителей суммарные затраты мощности носят более сглаженный характер.

Таким образом, увеличение числа ног в движителе существенно уменьшает инерционную нагруженность привода шагающей машины. В случае трехногего движителя дополнительная мощность на передвижение снижается почти в 2 раза по сравнению с базовым движителем. Это позволяет повысить скорость движения машины до 5 км/ч и выше. Еще большего положительного эффекта можно добиться, используя движители с четырьмя механизмами шагания. Основным очевидным недостатком увеличения числа ног в движителе – усложнение конструкции движителя, существенное увеличение его массы и громоздкость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артоболевский, И. И. Особенности и возможности шагающих машин / И. И. Артоболевский, А. П. Бессонов, Н. В. Умнов // Вопросы земледельческой механики. – М.: Изд-во ВИМ, 1978. – 44 с.
2. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1(1). – С. 6–14.
3. Briskin, E. S. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines / E. S. Briskin, V. V. Chernyshev, A. V. Maloletov et al. // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe – Germany, 2001. – Pp. 1005–1012.
4. Концепция проектирования шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога [и др.] // Наука – производству. – 2005. – № 1. – С. 33–38.
5. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 9. – С. 27–31.
6. Пат. № 2108708 С1 Российская Федерация, МПК А01G 25/09, В62D 57/02. Самоходная тележка многоопорной дождевальной машины / Е. С. Брискин, А. Е. Русаковский, В. В. Чернышев [и др.]; Волгоградский государственный технический университет. – № 95109634/13; заявл. 07.06.1995; опубл. 20.04.1998.
7. Чернышев, В. В. Моделирование динамики шагающей машины с цикловыми движителями как системы твердых тел с упругодиссипативными связями / В. В. Чернышев // Известия ВолгГТУ № 11 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 9). – С. 32–35.

Ответственный за выпуск
Ирина Петровна **ВЕРШИНИНА**

Оригинал-макет и электронная версия издания
подготовлены редакционно-издательским отделом
Издательства ВолГТУ

Корректурa **Л. Н. Рыжих**
Компьютерная верстка: **Е. В. Макарова**

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

Темплан 2023 г. Поз. № 8ж. Дата выхода в свет 15.09.2023 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,84. Уч.-изд. л. 8,97.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 394.

Отпечатано в типографии Издательства ВолГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.