

# ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского  
государственного  
технического  
университета

ISSN 1990-5297



Серия  
Роботы, мехатроника  
и робототехнические системы

16+

№ 4 (311)  
2026

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

**Редакционная коллегия:**

- Брискин Е. С.** – д-р физ.-мат. наук, профессор ВолгГТУ, г. Волгоград  
**Буренин А. А.** – чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Хабаровский Федеральный исследовательский центр, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре  
**Витязь П. А.** – академик Национальной академии наук Беларуси (НАНБ), Институт порошковой металлургии, г. Минск, Республика Беларусь  
**Голованчиков А. Б.** – д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ, г. Волгоград  
**Заякин О. В.** – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, Институт металлургии им. Н. А. Ватолина УрО РАН, г. Екатеринбург  
**Злотин С. Г.** – чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, профессор, Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН, г. Москва  
**Иванов В. К.** – академик РАН, д-р хим. наук, профессор, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, г. Москва  
**Ингеманссон А. Р.** – д-р техн. наук, АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград  
**Калита В. И.** – д-р техн. наук, профессор, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, г. Москва  
**Коберник Н. В.** – д-р техн. наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва  
**Колмаков А. Г.** – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, г. Москва  
**Королев А. В.** – д-р техн. наук, профессор, Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, г. Саратов  
**Красиков А. В.** – д-р техн. наук, АО «Волжский трубный завод», г. Волжский Волгоградская обл.  
**Кудряков О. В.** – д-р техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону  
**Кузьмин С. В.** – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград  
**Кураев А. А.** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь  
**Левашов Е. А.** – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор НИТУ «МИСиС», г. Москва  
**Лысак В. И.** – академик РАН, д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ, г. Волгоград  
**Макаров А. В.** – академик РАН, Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург  
**Максимов А. Л.** – академик РАН, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, г. Москва  
**Малолетов А. В.** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Университет Иннополис, г. Иннополис, Республика Татарстан  
**Навроцкий А. В.** – чл.-корр. РАН, д.х.н., профессор ВолгГТУ, г. Волгоград  
**Пай В. В.** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск  
**Первухин Л. Б.** – д-р техн. наук, ООО «Битруб Интернэшнл», г. Красноармейск, Московская обл.  
**Пустовойт В. Н.** – д-р техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону  
**Пышминцев И. Ю.** – д-р техн. наук, доцент, Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск  
**Русинов В. Л.** – чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, профессор УрФУ, г. Екатеринбург  
**Трифонов А. А.** – чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, профессор, Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, г. Москва  
**Шолохов М. А.** – д-р техн. наук, профессор, Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург  
**Шурыгин В. А.** – академик РАН, д-р техн. наук, генеральный конструктор АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград

Серия

«РОБОТЫ,  
МЕХАТРОНИКА  
И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ  
СИСТЕМЫ»

# ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

*Брискин Е. С.*, д.ф.-м.н., проф.

*Горобцов А. С.*, д.т.н., проф.

*Жога В. В.*, д.ф.-м.н., проф.

*Зейдис И.*, PhD, проф.,

Университет Ильменау  
(г. Ильменау, Германия)

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

*Калинин Я. В.*, к.т.н., доцент,  
Холдинг «Вертолеты России»

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

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

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

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

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

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

*Фоменков С. А.*, д.т.н., проф.

*Чернышев В. В.*, д.т.н., проф.

*Шаронов Н. Г.*, к.т.н., доцент

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

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

Ответственный секретарь

*Вершинина И. П.*

Тел.: 8 (8442) 24-81-13

Международный индекс журнала  
ISSN 1990-5297

Журнал распространяется  
по подписке.

Индекс журнала  
по объединенному каталогу

«Пресса России» – 80811

[https://www.pressa-  
rf.ru/cat/1/edition/y\\_e80811/](https://www.pressa-<br/>rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/)

Тел. Издательства ВолГТУ:

8 (8442) 24-84-05

8 (8442) 24-84-08

[zavrio@vstu.ru](mailto:zavrio@vstu.ru)

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

**№ 4 (311)**  
**Апрель**  
**2026**

УЧРЕДИТЕЛЬ:

ФГБОУ высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет»

Адрес редакции:

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.

Телефон: гл. редактор – 8(8442) 24-80-00

E-mail: [ianovakov@vstu.ru](mailto:ianovakov@vstu.ru)

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

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

Editor-in-Chief of the scientific journal "Izvestiya VSTU":

**Novakov I. A.** – Academician of RAS, Prof., Dr. Sci. (Chemistry), VSTU

**Editorial board:**

**Briskin E. S.** – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., VSTU, Volgograd

**Burinin A. A.** – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math), Institute of Machine Science and Metallurgy, Far Eastern Branch of the RAS, Komsomolsk-on-Amur

**Vityaz P. A.** – Academician of the NAS of Belarus, State Scientific Institution "Powder Metallurgy Institute", Minsk, Republic of Belarus

**Golovanchikov A. B.** – Dr. Sci. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd

**Zayakin O. V.** – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Institute of Metallurgy, Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

**Zlotin S. G.** – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), N. D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the RAS, Moscow

**Ivanov V. K.** – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), N. S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow

**Ingemansson A. R.** – Dr. Sci. (Engineering), JSC "FSC "Titan-Barrikady", Volgograd

**Kalita V. I.** – Dr. Sci. (Engineering), Prof., A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow

**Kobernik N. V.** – Dr. Sci. (Engineering), Bauman Moscow State Technical University, Moscow

**Kolmakov A. G.** – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow

**Korolev A. V.** – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Saratov State Technical University Ju. A. Gagarin, Saratov

**Krasikov A. V.** – Dr. Sci. (Engineering), Volzhsky Pipe Plant JSC, Volzhsky, Volgograd Region

**Kudryakov O. V.** – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Don State Technical University, Rostov-on-Don

**Kuzmin S. V.** – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd

**Kuraev A. A.** – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

**Levashov E. A.** – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Prof., NUST MISiS, Moscow

**Lysak V. I.** – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd

**Makarov A. V.** – Academician of the RAS, M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

**Maksimov A. L.** – Academician of the RAS, A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the RAS, Moscow

**Maloletov A. V.** – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., Innopolis University, Innopolis, Republic of Tatarstan

**Navrotsky A. V.** – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), Prof., VSTU, Volgograd

**Pai V. V.** – Dr. Sci. (Phys.-Math), Prof., Lavrentiev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk

**Pervukhin L. B.** – Dr. Sci. (Engineering), Prof., "Bitrub International" LLC, Krasnoarmeysk, Moscow Region

**Pustovoit V. N.** – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Don State Technical University, Rostov-on-Don

**Pyshmintsev I. Yu.** – Dr. Sci. (Engineering), Ass. Prof., Russian Scientific Research Institute of the Tube and Pipe Industries, Chelyabinsk

**Rusinov V. L.** – Corresponding Member of the RAS, Ph. Dr. Sci. (Chemistry), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg

**Trifonov A. A.** – Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Chemistry), Prof., A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the RAS, Moscow

**Sholokhov M. A.** – Dr. Sci. (Engineering), Prof. M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

**Shurygin V. A.** – Academician of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), JSC "FSC "Titan-Barrikady", Volgograd

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., Russian Helicopters

**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/](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](mailto:zavrio@vstu.ru)

© Volgograd State Technical University,  
"Izvestia VSTU", 2026

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

**№ 4 (311)**  
**April**  
**2026**

**FOUNDER:**

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

**Editorial office address:**

Volgograd, Lenin avenue, 28.

Tel.: Head Editor – +7 (8442) 24-80-00

**E-mail:** [ianovakov@vstu.ru](mailto:ianovakov@vstu.ru)

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

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

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

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

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Арабаджиев Д. И. 61, 68  
Артемяев К. С. 6  
Безусов С. О. 41  
Белкин У. В. 37  
Бордюгов Д. В. 48  
Брискин Е. С. 41  
Вершинина И. П. 41  
Габдерахманов В. М. 53  
Ганин П. Е. 76  
Давтян Н. С. 31  
Девяткин Ф. В. 68  
Дементьев Е. В. 9  
Дышеков А. И. 68  
Жога В. В. 25  
Захаров Н. В. 31  
Кадилханов Н. Р. 6, 48  
Ключиков А. В. 17  
Крайнов Р. В. 25  
Курочкин И. П. 17  
Мелихова Е. В. 53  
Нелюбова А. В. 25  
Николаев М. Е. 31  
Николаева В. В. 25  
Перфилов В. А. 31  
Приходский А. А. 37  
Прокопов А. С. 41, 48  
Прокопова В. С. 48  
Рогачев А. Ф. 53  
Самохин Н. Е. 17  
Ушакова М. А. 68  
Шереужев М. А. 61, 68  
Шестов Д. А. 76  
Шилин Д. В. 76

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

<i>Артёмьев К. С., Кадилханов Н. Р.</i> Лабораторная модель шагающего робота для исследования взаимодействия опор движителей с несущей поверхностью.....	6
<i>Дементьев Е. В.</i> Оптимизация расхода воздуха на подводной роботизированной платформе, перемещающейся по рельсовой дороге.....	9
<i>Курочкин И. П., Ключиков А. В., Самохин Н. Е.</i> Семантическая сеть предметной области применения мобильных сервисных роботов для уборки территорий.....	17
<i>Нелюбова А. В., Жога В. В., Крайнов Р. В., Николаева В. В.</i> Динамическое моделирование управляющих усилий манипулятора параллельно-последовательной структуры при механической обработке поверхностей.....	25
<i>Николаев М. Е., Перфилов В. А., Захаров Н. В., Давтян Н. С.</i> Синтез кинематического алгоритма управления манипулятором агрегата для возведения свайного фундамента.....	31
<i>Приходский А. А., Белкин У. В.</i> Сравнительный анализ алгоритмов координации в децентрализованных многоагентных системах с динамической топологией связи.....	37
<i>Прокопов А. С., Безусов С. О., Брискин Е. С., Вершинина И. П.</i> О перемещении груза с помощью группы беспилотных аппаратов.....	41
<i>Прокопов А. С., Бордюгов Д. В., Проколова В. С., Кадилханов Н. Р.</i> Об устройстве двухсекционного робота и управлении его движением.....	48
<i>Рогачев А. Ф., Мелихова Е. В., Габдерахманов В. М.</i> Фитотронный комплекс с интеллектуальной системой выявления заболеваний растений на основе мультимодальной нейронной сети.....	53
<i>Шереужев М. А., Арабаджиев Д. И.</i> Онтологически-обоснованное моделирование динамики коллаборативной ячейки с использованием стохастических сетей Петри..	61
<i>Шереужев М. А., Девяткин Ф. В., Арабаджиев Д. И., Дышеков А. И., Ушакова М. А.</i> Иерархическая система управления робототехническим комплексом на основе цветных сетей Петри и байесовской фильтрации в условиях неопределенности.....	68
<i>Шилин Д. В., Ганин П. Е., Шестов Д. А.</i> Нагрузочный расчет электроприводной системы трехкоординатного доильного робота.....	76
К сведению авторов.....	87

*К. С. Артемьев, Н. Р. Кадилханов*

**ЛАБОРАТОРНАЯ МОДЕЛЬ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПОР  
ДВИЖИТЕЛЕЙ С НЕСУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Никита Романович Кадилханов, han1003@yandex.ru

**Аннотация.** Представлена лабораторная модель, имитирующая шагающего робота, на основе которой проведены исследования взаимодействия опор движителей с несущей поверхностью. Экспериментально определены параметры движения и распределения нагрузок на опоры при шаговом перемещении робота. Изучены особенности контакта опор с поверхностью. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования конструкций мобильных робототехнических систем.

**Ключевые слова:** шагающий робот, лабораторная модель, робототехнические системы

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 25-29-01736, <https://rscf.ru/project/25-29-01736/>).

**Для цитирования:** Артемьев К. С., Кадилханов Н. Р. Лабораторная модель шагающего робота для исследования взаимодействия опор движителей с несущей поверхностью. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 6–9. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-с.

**Информация об авторах:**

**Кирилл Сергеевич Артемьев** – аспирант кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ  
e-mail: ksartemevv@gmail.com

**Никита Романович Кадилханов** – лаборант кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ  
e-mail: han1003@yandex.ru

**Вклад авторов:**

**К. С. Артемьев** – определение цели работы, обработка и анализ результатов исследования.

**Н. Р. Кадилханов** – проведение экспериментов, написание текста статьи.

*К. S. Artemyev, N. R. Kadilkhanov*

**LABORATORY MODEL OF A WALKING ROBOT FOR STUDYING  
THE INTERACTION OF PROPULSION SUPPORTS  
WITH A LOAD-BEARING SURFACE**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Nikita R. Kadilkhanov, han1003@yandex.ru

**Annotation.** The paper presents a laboratory model simulating a walking robot, on the basis of which studies of the interaction of propulsion supports with the bearing surface have been carried out. The parameters of movement and load distribution on the supports during the step movement of the robot have been experimentally determined. The features of the contact of the supports with the surface are studied. The results obtained can be used to improve the designs of mobile robotic systems.

**Keywords:** walking robot, laboratory model, robotic systems

**Funding:** the research was funded by a grant from the Russian Science Foundation (No 25-29-01736, <https://rscf.ru/en/project/25-29-01736/>).

**For citation:** Artemyev K. S., Kadilkhanov N. R. Laboratory model of a walking robot for studying the interaction of propulsion supports with a load-bearing surface. *Izvestia VSTU*. 2026; 4(311): 6–9. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-6-9.

**Information about the authors:**

**Kirill S. Artemyev** – Postgraduate Student, Department of Machine Dynamics and Strength, VSTU.

e-mail: ksartemevv@gmail.com

**Nikita R. Kadilkhanov** – Laboratory Assistant, Department of Machine Dynamics and Strength, VSTU.

e-mail: han1003@yandex.ru

**Contribution of the authors:**

**Kirill S. Artemyev** – defining the purpose of the work, processing and analyzing the research results.

**Nikita R. Kadilkhanov** – conducting experiments, writing the text of the article.

**Введение**

Шагающие роботы представляют перспективное направление мобильной робототехники, в частности в задачах, связанных с передвижением по пересеченной местности. В условиях, где колесные и гусеничные движители оказываются неэффективны, шагающие машины способны сохранять подвижность. Вместе с тем проектирование подобных систем требует детального понимания сил, возникающих при контакте шагающих движителей с опорной поверхностью.

К основным характеристикам взаимодействия относятся тяговая сила, определяющая способность робота к передвижению, и сила сопротивления движению, действующая на механизмы шагания со стороны опорной поверхности. Соотношение указанных величин определяет не только возможность перемещения машины в заданных условиях, но и ее курсовую устойчивость.

При движении шагающего робота тяговая сила и сила сопротивления движению распределены между движителями неравномерно. Когда часть движителей находится в фазе переноса, оставшиеся воспринимают всю нагрузку. Если при этом конфигурация расположения движителей, находящихся в контакте с опорной поверхностью, оказывается ассиметричной, распределение сил между левым и правым бортами становится неодинаковым, что может привести к неустойчивости курсового движения – рысканию шагающей машины.

Исследования влияния этих особенностей взаимодействия шагающих движителей с опорной поверхностью не могут иметь обобщающего характера при рассмотрении робота с конкретной конструктивной схемой. Поэтому в качестве объекта исследования разрабатывается лабораторный макет робота, у которого формируется геометрическая конфигурация мест установки опорных стоек относительно корпуса

и гарантированно обеспечивается равенство их относительных курсовых скоростей.

Разработанная лабораторная модель мобильного робота обеспечивает возможность изменения числа опорных элементов, их расположения, а также массы всей системы и в этом смысле позволяет исследовать характерные особенности движения шагающих роботов вне зависимости от их конкретных конструктивных схем.

**Описание лабораторной модели с шагающими движителями**

Установка представляет собой (см. рисунок) платформу 1, опирающуюся на некоторое количество вертикальных стоек 2, на концах которых закреплены опорные площадки 3. Стержень с опорной площадкой создают макет шагающего движителя. Платформа с движителями размещается на опорной поверхности 4, имеющей возможность изменять угол наклона  $\alpha$  относительно горизонта. На платформе закреплен подвижный груз 5, имитирующий вес корпуса робота, перемещаемый вдоль продольной оси при помощи линейного привода 6, жестко связанного с платформой.

Перемещение груза вызывает перераспределение нормальных реакций на опорных элементах, что при определенных условиях может привести к их проскальзыванию на опорной поверхности.

Платформа выполнена симметричной относительно продольной оси и служит несущим элементом всех движителей, расположенных вдоль левого и правого бортов платформы. Груз с приводом размещены таким образом, что перемещение груза происходит строго вдоль продольной оси без поперечного смещения.

Опорные стойки шагающих движителей выполнены жесткими, идентичными и установлены перпендикулярно плоскости платформы на одинаковом поперечном расстоянии от продольной оси.

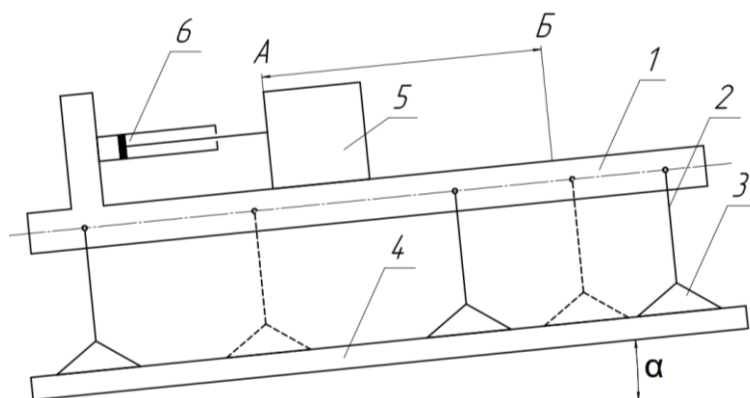


Схема лабораторной установки:

1 – платформа; 2 – стержень; 3 – опорная площадка; 4 – опорная поверхность;  
5 – груз; 6 – линейный привод

Асимметрия конфигурации создается за счет различного числа опорных стоек на левом и правом борту, а также их произвольного расположения вдоль продольной оси. Асимметрия является необходимым условием возникновения эффекта курсовой неустойчивости движителей, а у реальных шагающих машин [1, 2] она обусловлена походкой. Опорные площадки движителей взаимодействуют с опорной поверхностью как посредством сухого трения, так и за счет внедрения в опорную среду.

Груз размещен на платформе и может перемещаться вдоль ее продольной оси между двумя крайними положениями, обозначенными А и Б на рисунке. Движение груза осуществляется равномерно, без ускорений. При равномерном движении инерционные силы отсутствуют, и наблюдаемые эффекты определяются квазистатическим перераспределением нормальных реакций.

Опорная поверхность в исходном состоянии расположена горизонтально,  $\alpha = 0$ .

#### Методика проведения экспериментальных исследований

В исходном состоянии опорная поверхность горизонтальна. Платформа с грузом устанавливается на опоры шагающих движителей, расположенных асимметрично вдоль продольной оси. Центр масс системы расположен на продольной оси. Нормальные реакции на опорах распределены в соответствии с геометрической конфигурацией расположения опорных стоек [3] и положением центра масс.

Сила сопротивления, зависящая как от коэффициента сцепления опор с опорной поверхностью, так и от глубины их заглупления [4, 5], моделируется наклоном опорной поверхности на угол  $\alpha$  (см. рисунок). В процессе перемеще-

ния груза как корпуса робота происходит перераспределение нормальных реакций при неизменности их суммарной величины. При движении по поверхности с пластическими свойствами снижение нагрузки на движитель не приводит к уменьшению глубины его заглупления. Поэтому тяговые свойства движителей на каждом из этапов их неизменяемой конфигурации могут только возрастать и определяются как коэффициентом сцепления опор с опорной поверхностью, так и суммой максимальных глубин заглупления всех движителей на рассматриваемом этапе. В экспериментальных исследованиях каждый этап формируется задаваемой конфигурацией движителей и начальной установкой перемещающего груза 5 (см. рисунок). В процессе экспериментальных исследований при заявленной конфигурации устанавливается суммарная максимальная касательная сила взаимодействия опор движителя с опорной поверхностью, вычисляемой по углу  $\alpha$ , при котором начинается проскальзывание опор. Походка задается последовательностью конфигураций и начальным расположением груза. В результате для любой формируемой походки можно определить максимально возможное тыловое усилие.

Разработанная лабораторная модель шагающего робота позволяет исследовать и курсовую устойчивость движения. Для этого на каждом этапе движения, характеризуемом неизменностью конфигурации, определяется поворот продольной оси робота в горизонтальной плоскости.

Исследование условий возникновения этого эффекта необходимо для проектирования систем управления, способных компенсировать нежелательный поворот и улучшить курсовую устойчивость.

### Заключение

Разработана лабораторная установка для исследования влияния сил взаимодействия шагающего робота с опорной поверхностью.

Конструкция установки обеспечивает возможность варьирования основных параметров – массы груза, числа и расположения движителей.

Результаты экспериментов могут быть использованы для верификации расчетных моделей взаимодействия шагающих машин с поверхностью, а также для выработки рекомендаций по выбору конфигурации опорных элементов и стратегий управления, обеспечивающих курсовую устойчивость.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатъев, М. Б.* Алгоритмы управления роботами-манипуляторами / М. Б. Игнатъев, Ф. М. Кулаков, А. М. Покровский. – Л. : Машиностроение, 1972. – 248 с.
2. *Брискин, Е. С.* Об устойчивости плоского движения мобильных роботов / Е. С. Брискин, К. С. Артемьев, И. П. Вершинина, А. В. Малолетов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(244) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 11–16.
3. *Смирная, Л. Д.* Об оптимальном распределении нормальных реакций шагающих движителей подводных роботов / Л. Д. Смирная, И. П. Вершинина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3(226) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – С. 47–50.

4. *Брискин, Е. С.* О позиционной зависимости тягово-сцепных свойств шагающих машин с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, Н. Е. Фролова // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 6. – С. 21–25.

5. *Брискин, Е. С.* Экспериментальные исследования динамики многоопорной шагающей машины с движителями лямбдаобразного вида / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1999. – № 4. – С. 32–37.

### REFERENCE

1. *Ignatiev, M. B.* Algorithms for controlling robot manipulators / M. B. Ignatiev, F. M. Kulakov, A. M. Pokrovsky – L. : Mashinostroenie, 1972. – 248 p.
2. *Briskin, E. S.* On the stability of the flat motion of mobile robots / E. S. Briskin, K. S. Artemev, I. P. Verшинina, A. V. Maloletov // Izvestia VSTU. – 2020. – No. 9(244). – Pp. 11–16.
3. *Smirnaya, L. D.* On the optimal distribution of normal reactions of walking propellers of underwater robots / L. D. Smirnaya, I. P. Verшинina // Izvestia VSTU. – 2019. – No. 3(226). – Pp. 47–50.
4. *Briskin, E. S.* On the positional dependence of traction properties of walking machines with cyclic propellers / E. S. Briskin, V. V. Chernyshev, N. E. Frolova // Tractors and agricultural machinery. – 2009. – No. 6. – Pp. 21–25.
5. *Briskin, E. S.* Experimental studies of the dynamics of a multi-support walking machine with lambda-shaped propellers / E. S. Briskin, V. V. Chernyshev // Proceedings of Higher Educational Institutions. MachineBuilding. – 1999. – No. 4. – Pp. 32–37.

Статья поступила в редакцию 12.02.2026, доработана 25.02.2026, подписана в печать 16.03.2026  
The article was submitted 12.02.2026, revised 25.02.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 62-529.4+629.369  
DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-9-17

Научная статья  
Original article

*Е. В. Дементьев*

### ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА НА ПОДВОДНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЕ, ПЕРЕМЕЩАЮЩЕЙСЯ ПО РЕЛЬСОВОЙ ДОРОГЕ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Евгений Владимирович Дементьев, evg7360@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматривается способ оптимизации расхода сжатого воздуха при управлении подводной роботизированной платформой, перемещающейся под водой по рельсовой дороге с использованием естественных силовых воздействий. Описывается механизм увеличения выталкивающей архимедовой силы в системе, представляющей собой цилиндр с подвижным поршнем, работающим в пассивном режиме – его перемещение происходит под действием разности давления, а как следствие – увеличение скорости его перемещения. Приведены примеры устройств и механизмов, работающих по тому же принципу. Сделан обзор пассивных систем изменения плавучести. Представлен способ применения изменяющейся выталкивающей силы для экономии запаса воздуха в подводной роботизированной транспортной системе. Произведен расчет оптимального режима движения, при котором существенно увеличивается пройденное расстояние при прежней «эталонной» скорости.

**Ключевые слова:** подводная транспортная система, изменение плавучести, метод управления, подводные рельсы, изменяющаяся выталкивающая сила

Для цитирования: Дементьев Е. В. Оптимизация расхода воздуха на подводной роботизированной платформе, перемещающейся по рельсовой дороге. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 9–17. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-4-311-9-17.

**Информация об авторах:**

**Евгений Владимирович Дементьев** – аспирант кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ  
e-mail: evg7360@yandex.ru

**Вклад авторов:**

**Е. В. Дементьев** – определение цели работы, написание статьи.

*E. V. Dementyev*

**OPTIMIZATION OF AIR DISSIPATION ON AN UNDERWATER  
ROBOTIC PLATFORM, MOVING ON A RAILWAY**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Evgeny V. Dementyev, evg7360@yandex.ru

**Abstract.** The article discusses a method for optimizing the consumption of compressed air when controlling an underwater robotic platform that moves along a rail track using natural forces. It describes a mechanism for increasing the Archimedean force in the system, which consists of a cylinder with a movable piston that operates in a passive mode. The piston moves due to the difference in pressure, resulting in an increase in its speed. The article provides examples of devices and mechanisms that use the same principle. It also provides a review of passive systems for changing buoyancy. The paper presents a method for using a variable buoyancy force to save air in an underwater robotic transport system. The paper calculates the optimal mode of motion, which significantly increases the distance traveled at the same “reference” speed.

**Keywords:** underwater transport system, variable buoyancy, control method, underwater rails, changing buoyant force

**For citation:** Dementyev E. V. Optimization of air dissipation on an underwater robotic platform, moving on a railway. Izvestiya VSTU. 2026; 4(311): 9–17. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-4-311-9-17.

**Information about the author:**

**Evgeny V. Dementyev** – Postgraduate Student of the Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU  
e-mail: evg7360@yandex.ru

**Contribution of the authors:**

**Evgeny V. Dementyev** – defining the purpose of the work, writing the article.

**Введение**

Одним из активно развивающихся направлений в робототехнике является разработка мобильных роботов, перемещающихся по дну водоема [1, 2]. Их преимуществом перед плавающими роботами является возможность выполнения различных операций с опорой на грунт, что обеспечивает их достаточно надежное позиционирование. Перемещение по подводному грунту – сложная задача в силу непредсказуемости геометрических, физико-механических свойств опорной поверхности, а также внешних воздействий. В этих случаях известен опыт применения гусеничных движителей, обеспечивающих приемлемую профильную и опорную проходимость [3, 4]. Используются шагающие и «шагающеподобные» движители различных типов, обеспечивающие более высокую проходимость и маневренность [5, 6]. Однако наилучшая проходимость обеспечивается с помощью заранее организованной трассы, например, за счет перемещения робота по рельсовой дороге (рис. 1).

Для обеспечения движения подводной роботизированной платформы 7 (см. рис. 1) (далее – «платформа») предусмотрен двигатель, обеспечивающий реализацию тягового усилия. В качестве источника энергии в этих условиях можно использовать резервуары со сжатым воздухом, установленные на платформе [7, 8]. Тогда управление движением таких платформ осуществляется за счет дискретного регулирования расхода воздуха на каждом отрезке рельсового пути, соответствующего фазе подъема и спуска. Воздух, вытесняя жидкость из жестких балластных понтонов, представляющих из себя цилиндр с поршнем, обеспечивает положительную плавучесть платформы, что в совокупности с реакцией восходящего рельсового пути вызывает его движение и в горизонтальном направлении.

При выпуске воздуха из балластных емкостей и их заполнении жидкостью плавучесть становится отрицательной, поэтому на нисходящей ветви рельсового пути движение в горизонтальном направлении продолжается.

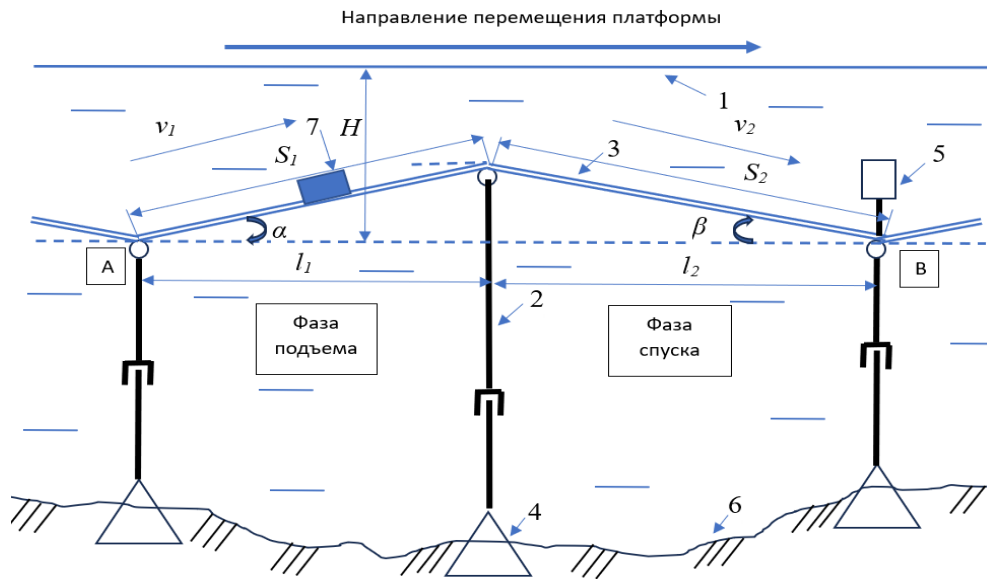


Рис. 1. Кинематическая схема передвижения подводной роботизированной платформы:  
 1 – поверхность водоема; 2 – несущая мачта; 3 – рельсовый путь; 4 – опора мачты; 5 – дополнительный баллон со сжатым воздухом; 6 – рельеф дна; 7 – подводная роботизированная платформа;  $H$  – глубина погружения платформы;  $S_1$  – длина восходящего участка трассы;  $S_2$  – длина нисходящего участка трассы;  $\alpha$  – угол наклона рельса восходящего участка трассы;  $\beta$  – угол наклона рельса нисходящего участка трассы;  $l_1$  – перемещение по восходящему участку трассы по горизонтали;  $l_2$  – перемещение по нисходящему участку трассы по горизонтали;  $v_1$  – скорость на восходящем участке трассы;  $v_2$  – скорость на нисходящем участке трассы;  $AB$  – горизонтальный уровень нахождения нижних участков трассы

Кинематическая схема движения тела по наклонной плоскости представлена на рис. 2, где  $F_{\text{выт}}$  – выталкивающая сила, возникающая при вытеснении регулируемого объема жидкости  $\delta V$  в каждом цикле;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения между направляющими и опорными элементами платформы;  $F_{\text{сопр}}$  – сила сопротивления движению платформы со стороны жидкости, полагаемая квадратичной функцией скорости движения платформы;  $m$  – масса платформы;  $f$  – коэффициент трения между платформой и направляющими;  $\mu$  – коэффициент вязкого сопротивления жидкости,  $v$  – скорость движения платформы;  $\alpha$ ,  $\beta$  – углы наклона поверхности

к горизонту (для упрощения принимаем угол подъема и угол спуска равными  $\alpha = \beta$ ); плотность воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $F_{\text{выт}} = \rho g V$ ;  $\delta V$  – объем вытесненной воды, необходимой для обеспечения заданной положительной плавучести и как следствие – заданной скорости движения платформы. Тогда  $Q$  – отрицательная плавучесть:

$$Q = mg - F_{\text{выт}}; F_{\mu} = \mu v^2; F_{\text{тр}} = fN; F_{\text{в}} = \rho g \delta V, \quad (1)$$

где  $F_{\text{выт}}$  – выталкивающая сила, зависящая от формы и конструкции платформы;  $N$  – сила реакции опоры.

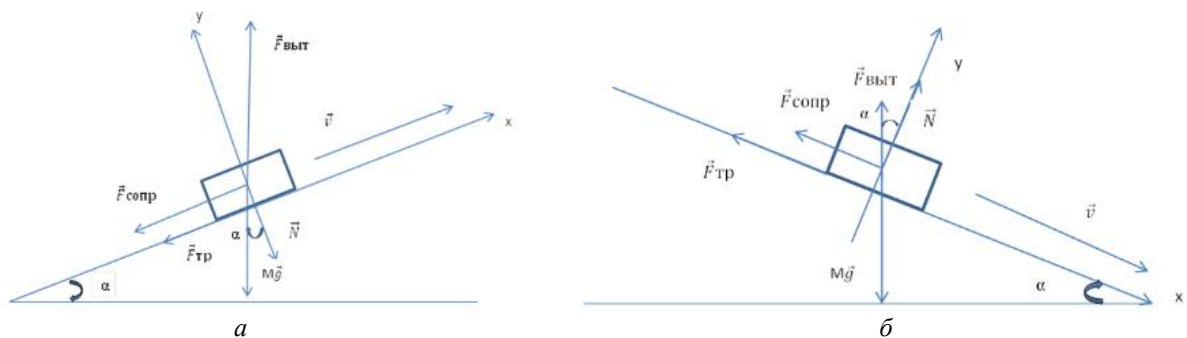


Рис. 2. Кинематическая схема движения груза по наклонной поверхности:  
 а – подъем; б – спуск

Уравнение движения тела по наклонной плоскости:

$$M \frac{dv}{dt} = (F_{\text{выт}} - Q)[\sin \alpha - f \cos \alpha] - \mu v^2. \quad (2)$$

При  $t \rightarrow \infty$ , скорость  $v \rightarrow v_{\text{уст}}$ , ускорение  $dv/dt = 0$ , тогда установившаяся скорость при подъеме:

$$v_{\text{уст}}^{\text{подъем}} = \sqrt{\frac{(\rho g \delta V - Q)(\sin \alpha - f \cos \alpha)}{\mu}}. \quad (3)$$

Аналогично подъему, установившаяся скорость при спуске:

$$v_{\text{уст}}^{\text{спуск}} = \sqrt{\frac{Q(\sin \alpha - f \cos \alpha)}{\mu}}. \quad (4)$$

Для максимизации скорости спуска  $F_{\text{выт}} = 0$ .

### Принцип работы рельсовой дороги за счет управления выталкивающей силой

Метод, обеспечивающий управление величиной выталкивающей силы, основан на принципе чередующегося опорожнения и заполнения понтонов водой. Общая конструктивная схема представлена на рис. 3.

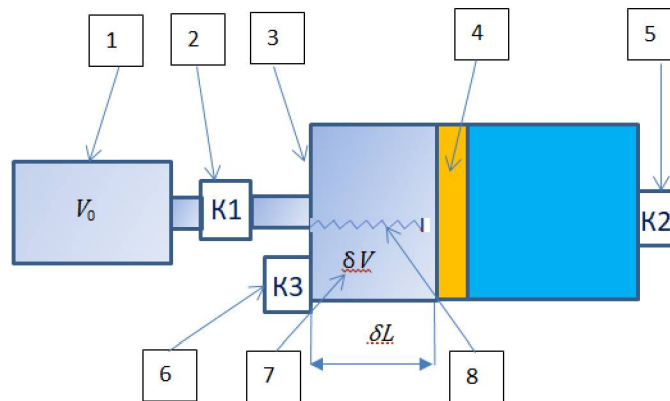


Рис. 3. Конструктивная схема системы с жестким воздушным понтоном с изменяющейся плавучестью (далее – «пonton»): 1 – резервуар высокого давления с воздухом (далее – «резервуар»); 2 – управляемый клапан K1; 3 – управляемый понтон; 4 – поршень; 5 – управляемый клапан K2; 6 – управляемый клапан K3; 7 – вытесненный необходимый объем воды  $\delta V$ ; 8 – возвратная (дисциплинирующая) пружина

Система состоит из резервуара со сжатым воздухом  $I$  (см. рис. 3) объемом  $V_0$ , установленного на платформе 7 (см. рис. 1), системы клапанов  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  и жесткого балластного понтона 3, представляющего собой пневмоцилиндр с поршнем 4 и дисциплинирующей пружиной 8 жесткостью  $C$ . При подаче воздуха в пневмоцилиндр поршень 4 перемещается на заданное расстояние  $\delta L$ , образуя объем 7, равный  $\delta V$ , необходимый для получения требуемой выталкивающей силы  $F_{\text{выт}}$ .

В начальный момент времени поршень 4 находится в исходном крайнем левом положении, понтон заполнен водой, все клапаны  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  закрыты, платформа имеет отрицательную плавучесть, находится на глубине  $H$  и, взаимодействуя с направляющей, погружается, одновременно перемещаясь в горизонтальном направлении.

Управление платформой на восходящей ветви может осуществляться следующим образом. На этапе подъема платформы клапан  $K3$  закрыт, а клапаны  $K1$  и  $K2$  открываются до тех

пор, пока давление воздуха  $P_N$  в  $N$ -ом цикле станет равным:

$$P_N = \frac{P_{N-1} V_0}{V_0 + \delta \tilde{V}}, \quad (5)$$

где  $\delta \tilde{V}$  – вытесненный на рассматриваемом этапе объем воды.

Затем клапан  $K1$  закрывается, но продолжается вытеснение воды из резервуара до момента выравнивания давления в понтоне до давления окружающей среды:

$$P_N \delta \tilde{V} = P_{\text{окр}} \delta V. \quad (6)$$

Совместное решение уравнений (5) и (6) относительно неизвестных  $\delta \tilde{V}$  и  $P_N$  позволяет их определить при известных  $P_{\text{окр}}$ ,  $V_0$ ,  $\delta V$  и контролируемым давлением  $P_{N-1}$ :

$$\delta \tilde{V} = \frac{P_{\text{окр}} \delta V V_0}{P_{N-1} V_0 - P_{\text{окр}} \delta V}; P_N = P_{N-1} - \frac{P_{\text{окр}} \delta V}{V_0}. \quad (7)$$

Анализ полученных результатов (7) показывает, что при таком методе управления давление в резервуаре высокого давления должно на каждом этапе уменьшаться на одну и ту же

величину  $\Delta P = P_{\text{окр}} \delta V \cdot V_0$ . Тогда максимальное количество циклов  $N_2$  составляет:

$$N_2 = \frac{P_0 - P_{\text{окр}}}{\Delta P} = \frac{P_0 - P_{\text{окр}}}{P_{\text{окр}}} \frac{V_0}{\delta V} = \gamma \frac{V_0}{\delta V}, \quad (8)$$

где  $\gamma = (P_0 - P_{\text{окр}})/P_{\text{окр}}$ ,  $P_{\text{окр}}$  – давление окружающей среды (воды) на глубине  $H$ ,  $P_{\text{окр}} = \rho g H + P_{\text{атм}}$ ,  $P_0$  – начальное давление сжатого воздуха в резервуаре.

Для возвращения поршня 4 в исходное крайнее левое положение, что необходимо на этапе спуска платформы по направляющим, клапаны  $K2$  и  $K3$  открываются, давление в полостях понтона выравнивается, а дисциплинирующая пружина 8 способствует гарантированному перемещению в исходное положение поршня и подготовке системы к следующему циклу. Равномерность движения на наклонных участках трассы достигается путем баланса движущих сил и сил сопротивления. При формировании сцепки из нескольких платформ с помощью геометрических связей и включении в трассу горизонтальных участков в верхних и нижних точках достигается более равномерная скорость движения при переходе с восходящего на нисходящий участок трассы и наоборот [9].

**Постановка задачи**

Выталкивающая сила Архимеда представляется как:

$$F_a = \rho g V,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (воды);  $g$  – ускорение свободного падения;  $V$  – объем погруженной части тела (или всего тела, если оно под водой).

При уменьшении или увеличении объема сила выталкивания пропорционально изменяется.

В технике существует метод пассивного или самопроизвольного изменения объема понтонных систем. Под понтонными системами могут пониматься различные технологические

устройства, представляющие собой цилиндр с подвижным поршнем, сифоном (гофрированная трубка) или мембраной (воздушный эластичный мешок), в которых подвижный элемент (поршень, мембрана, сифон) разделяет внутреннюю полость аппарата и внешнюю среду [10]. Подвижный поршень (или его аналог) находится под действием двух сил – внешнего гидростатического и внутреннего давления (газовой пружины, упругости конструкции, рабочей жидкости или газа). Изменение внешнего давления вызывает перемещение поршня в новое положение равновесия, что и обеспечивает выполнение полезной работы (компенсацию, регулировку, срабатывание).

В поршневых понтонных устройствах, которые используются для подводных установок добычи нефти и газа на глубинах до 3000 м и более, поршень свободно перемещается, уравновешивая давление внутри емкостей (с газом, воздухом, маслом) с наружным давлением. Это предотвращает разрушение оборудования от перепада давлений. Мембрана быстро выходит из строя из-за усталости материала при многократных деформациях, гофрированная трубка дорога в изготовлении, имеет большой вес и габариты. В связи с этим наиболее широкое распространение получили поршневые понтоны (компенсаторы).

Таким образом, цилиндр с подвижным поршнем в пассивном режиме – это прежде всего надежный и долговечный компенсатор давления. Он повсеместно используется там, где нужно защитить внутренний объем подводного аппарата от высокого давления воды, не тратя при этом энергию. Это позволяет электронике, гидравлике и другим системам работать в ненагруженном режиме. Типы устройств приведены в таблице.

**Устройства, использующие пассивный режим выравнивания гидростатического давления**

Тип устройства	Функция	Принцип пассивного действия
Компенсатор давления	Защита электроники и гидравлики от перепада давлений	Поршень, на который давит забортная вода, сжимает внутреннюю среду до выравнивания давлений [11]
Компенсатор качки (СПНС)	Демпфирование рычков троса при спуске оборудования	Дополнительный поршневой цилиндр создает силу, точно компенсирующую силу от гидростатического давления на основной шток [12]
Глубинный клапан	Автоматическое управление механизмом выброса в зависимости от глубины	Поршень дросселя перемещается, уравновешивая давление воды и усилие пружины, изменяя проходное сечение [12]

При подъеме с глубины внешнее гидростатическое давление уменьшается  $P_{\text{окр}} = \rho g H + P_{\text{атм}}$ , подпоршневой объем (в случае свободного перемещения поршня) обратно пропорционален давлению  $V \sim 1/P$  и увеличивается по закону  $PV = \text{const}$  (в случае изотермического процесса). Архимедова сила также возрастает по мере всплытия. Таким образом, для цилиндра со свободно перемещающимся поршнем архимедова сила увеличивается с приближением к поверхности. Это создает эффект положительной обратной связи: чем ближе к поверхности, тем больший объем, тем большая выталкивающая сила, тем более высокая скорость всплытия.

Ставится задача, используя принцип пассивного режима выравнивания гидростатического давления, снизить расход сжатого воздуха при сохранении прежней «эталонной» скорости перемещения, определить процент экономии воздуха и увеличения количества циклов при тех же условиях, а также оценить увеличение объема цилиндра.

#### Метод решения

На рисунке 4 представлен понтон со свободно перемещающимся (пассивным) поршнем.

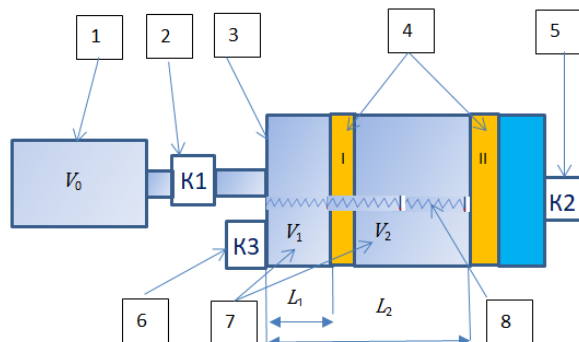


Рис. 4. Конструктивная схема системы с жестким воздушным понтоном со свободно перемещающимся поршнем

Система, как и в первом случае состоит из резервуара со сжатым воздухом  $I$  объемом  $V_0$ , установленного на платформе 7 (см. рис. 1), системы клапанов и жесткого балластного понтона 3, представляющего собой пневмоцилиндр с поршнем 4 с увеличенным ходом и дисциплинирующей пружиной 8 жесткостью  $C$ . При подаче воздуха в пневмоцилиндр поршень 4 перемещается на расстояние  $L_1$ , образуя объем, равный  $V_1$ , необходимый для получения оптимальной выталкивающей силы  $F_{\text{выт}}$ , при которой средняя скорость движения роботизированной подводной транспортной системы на восходящем участке трассы будет равна «эта-

лонной», как в основном способе управления подъемом, см. уравнение (3).

В начальный момент времени поршень 4 находится в исходном крайнем левом положении, понтон заполнен водой, все клапаны  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  закрыты, платформа имеет отрицательную плавучесть, находится на глубине  $H$  и, взаимодействуя с направляющей, погружается, одновременно перемещаясь в горизонтальном направлении.

Управление платформой на восходящей ветви осуществляется следующим образом. На этапе подъема платформы клапан  $K3$  закрыт, а клапаны  $K1$  и  $K2$  открываются до тех пор, пока давление воздуха станет  $P_1 = P_{\text{окр}}$  в объеме  $V_1 < \delta V$  (уравнение (3)). Поршень перемещен на расстояние  $L_1$ . Клапан  $K1$  закрывается,  $K2$  продолжает оставаться открытым. По мере движения вверх объем подпоршневого пространства  $V_1$  увеличивается до  $V_2$ , поршень перемещается на расстояние  $L_2$  от крайнего левого положения, скорость по мере увеличения выталкивающей силы растет. При достижении верхней точки трассы, клапан  $K3$  открывается, поршень возвращается в исходное крайнее левое положение за счет пружины.

Необходимо вычислить объем  $V_1$ , при котором средняя скорость будет равна  $v_{\text{уст}}^{\text{подъем}}$ , см. уравнение (4).

#### Решение

Рассматривается подводная платформа, движущаяся по наклонной направляющей вверх от глубины  $H$  до глубины  $h$  ( $H > h$ ). Понтон выполнен в виде цилиндра с поршнем, подпоршневое пространство заполнено воздухом, за поршнем – вода с текущим гидростатическим давлением  $P(y) = P_0 + \rho g y$ . При постоянной массе воздуха в понтоне его объем  $V$  изменяется обратно пропорционально давлению (изотермический процесс):

$$V(y) = V_1 \frac{P_H}{P(y)}, \quad (9)$$

где  $V_1$  – объем воздуха в понтоне при давлении  $P_H = \rho g H + P_{\text{атм}}$  (в нижней точке).

Выталкивающая сила:

$$F_{\text{выт}}(y) = \rho g V(y) = \rho g V_1 \frac{P_H}{P(y)}. \quad (10)$$

Уравнение движения платформы вдоль направляющей с учетом квадратичного сопротивления воды и силы трения:

$$M \frac{dy}{dt} = (F_{\text{выт}}(y) - Q)(\sin \alpha - f \cos \alpha) - \mu v^2. \quad (11)$$

Принимаем приближение, когда скорость быстро достигает установившегося значения для текущей глубины:

$$v(y) = \sqrt{\frac{(F_{\text{выт}}(y) - Q)(\sin \alpha - f \cos \alpha)}{\mu}}. \quad (12)$$

Вертикальная составляющая скорости:

$$\frac{dy}{dt} = -v(y) \sin \alpha = -\sin \alpha \sqrt{\frac{\left(\rho g V_1 \frac{P_H}{P(y)} - Q\right)(\sin \alpha - f \cos \alpha)}{\mu}}. \quad (13)$$

Время подъема платформы от  $H$  до  $h$ :

$$T = \int_h^H \frac{dy}{\sin \alpha \sqrt{\frac{\left(\rho g V_1 \frac{P_H}{P(y)} - Q\right)(\sin \alpha - f \cos \alpha)}{\mu}}}. \quad (14)$$

Для эталонного режима с жестким понтоном постоянного объема  $\delta V$  выталкивающая сила постоянна  $F_{\text{const}} = \rho g \delta V$ , установившаяся скорость:

$$v_{\text{const}} = \sqrt{\frac{(\rho g \delta V - Q)(\sin \alpha - f \cos \alpha)}{\mu}}. \quad (15)$$

Время подъема:

$$T_{\text{const}} = \frac{H - h}{\sin \alpha v_{\text{const}}}. \quad (16)$$

$$\left[ -\frac{\sqrt{P}}{Q} \sqrt{\rho g V_1 P_H - QP} + \frac{\rho g V_1 P_H}{Q \sqrt{Q}} \arcsin \left( \sqrt{\frac{QP}{\rho g V_1 P_H}} \right) \right]_{P_h}^{P_H} = \frac{P_H - P_h}{\sqrt{\rho g \delta V - Q}}. \quad (19)$$

Уравнение (19) связывает искомый объем  $V_1$  с заданными параметрами  $H, h, \rho, g, P_0, Q, \delta V$ . Оно решается численно.

### Численный пример

**Исходные данные** (приняты для определенности):

- $H = 50$  м;  $h = 5$  м;  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $P_{\text{атм}} = 101325$  Па;  $P_H = P_{\text{атм}} + \rho g H = 591825$  Па;  $P_h = 150375$  Па;

- отрицательная плавучесть платформы  $Q = 5000$  Н;

- объем понтона при первом способе управления:  $\delta V = 1$  м<sup>3</sup>;

- $\rho_{\text{возд}} = 1,2$  кг/м<sup>3</sup> при  $P_{\text{атм}}$  и температуре 20°C.

Решение уравнения (19) дает:

$$V_1 \approx 0,663 \text{ м}^3.$$

Условие равенства средних скоростей (или времен подъема) записывается как:

$$\int_h^H \frac{dy}{\sqrt{\rho g V_1 \frac{P_H}{P(y)} - Q}} = \frac{H - h}{\sqrt{\rho g \delta V - Q}}, \quad (17)$$

множители  $(\sin \alpha - f \cos \alpha)/\mu$  сократились.

Перейдем к переменной  $P = P(y)$ :  $dy = \frac{dP}{\rho g}$ .

Тогда (17) примет вид:

$$\frac{1}{\rho g} \int_{P_h}^{P_H} \frac{dP}{\sqrt{\rho g V_1 \frac{P_H}{P} - Mg}} = \frac{P_H - P_h}{\rho g \sqrt{\rho g \delta V - Mg}}. \quad (18)$$

Окончательно:

При этом

$$V_2 \approx 0,663 \text{ м}^3 \frac{P_H}{P_h} \approx 2,6 \text{ м}^3.$$

### Сравнение расхода воздуха

Масса воздуха, потребляемая за один подъем:

- в понтоне при первом «эталонном» способе управления:

$$m_{\text{этал}} = \rho_{\text{возд}} \delta V \frac{P_H}{P_0} = 1,2 \cdot 1 \cdot 5,84 = 7,008 \text{ кг};$$

- понтон с пассивным расширением воздуха:

$$m_{\text{пасс}} = \rho_{\text{возд}} V_1 \frac{P_H}{P_0} = 1,2 \cdot 0,663 \cdot 5,84 = 4,644 \text{ кг}.$$

Экономия воздуха за цикл:

$$\Delta m = 7,008 - 4,644 = 2,364 \text{ кг};$$

$$\frac{\Delta m}{m_{\text{этал}}} = 33,7\%.$$

### Увеличение количества циклов

Пусть начальный запас воздуха в резервуаре высокого давления (РВД):  $V_{РВД} = 1 \text{ м}^3$ ;  
 $P_{нач} = 200 \text{ атм} = 200 \cdot P_{атм}$ .

Масса воздуха в РВД:

$$M_{РВД} = \rho_{возд} \cdot V_{РВД} \cdot \frac{P_{нач}}{P_0} = 1,2 \cdot 1 \cdot 200 = 240 \text{ кг.}$$

Количество циклов:

• в понтоне при первом способе управления:

$N_{этал} = 240/7,008 \approx 34,2 \rightarrow 34$  цикла (последний цикл возможен при остаточном давлении  $\geq P_H$ );

• понтон с пассивным перемещением поршня:

$$N_{пасс} = 240/4,644 \approx 51,7 \rightarrow 51 \text{ цикл.}$$

Увеличение числа циклов:

$$\frac{N_{пасс} - N_{этал}}{N_{этал}} \approx \frac{51 - 34}{34} = 50 \text{ \%}.$$

### Закключение

Предложена математическая модель движения платформы с расширяющимся воздухом в понтоне.

Для заданных условий ( $H = 50 \text{ м}$ ,  $Q = 5000 \text{ Н}$ ,  $\delta V = 1 \text{ м}^3$ ) определен начальный объем  $V_1 = 0,663 \text{ м}^3$ , обеспечивающий ту же среднюю скорость подъема, что и при использовании понтона в эталонном случае.

Расход воздуха сокращается на 33,7 %, количество рабочих циклов возрастает на 50 % (с 34 до 51).

Конструкция не требует дополнительных рекуперационных емкостей и компрессоров, что повышает ее надежность и простоту.

Таким образом, использование поршневого понтона с расширением воздуха при подъеме является эффективным и экономичным способом увеличения автономности подводной транспортной системы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев, М. Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М. Д. Агеев, А. В. Инзарцев, Л. В. Киселев и др.; отв. ред. М. Д. Агеев; Российская академия наук, Институт проблем морских технологий ДВОРАН. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. Кожемякин, И. В. Тенденции развития и области применения подводных планеров (глайдеров) / И. В. Кожемякин, М. Л. Ростроса // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – Вып. 2(384). – С. 135–144.
3. Шурыгин, В. А. Технология применения подводных шагающих роботизированных платформ при освоении подводных (подледных) месторождений углеводородов / В. А. Шурыгин, В. А. Серов, И. В. Ковшов, С. А. Устинов // VII всероссийская науч.-техн. конф. «Технические про-

блемы освоения Мирового океана» (2–6 октября 2017 г.): матер. конф. – ФАНО РФ, РФФИ (грант №17-08-20517), ФГБУН «Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН (ИПМТДВОРАН)». – Владивосток, 2017. – С. 43–47.

4. Киселев, Л. В. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / Л. В. Киселев, А. В. Инзарцев, Ю. В. Матвиенко [и др.]; отв. ред. Л. В. Киселев. – Владивосток: Дальнаука, 2018. – 368 с.

5. Тимофеев, И. П. Шагающие машины для освоения ресурсов морского дна / И. П. Тимофеев. – Л.: ЛГИ, 1987. – 176 с.

6. Охотимский, Д. Е. Шагающие машины / Д. Е. Охотимский, А. К. Платонов, А. А. Кирилченко, В. В. Лапшин // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР, 1989. – 36 с.

7. Дементьев, Е. В. Способ подводного перемещения грузов / Е. В. Дементьев, Е. С. Брискин, А. Е. Гаврилов; патент RU2829977C1. ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2025.

8. Дементьев, Е. В. Подводная колея для транспортировки грузов / Е. В. Дементьев, Е. С. Брискин, А. Е. Гаврилов; патент RU231713U1. ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2024.

9. Дементьев, Е. В. О пространственной ориентации направляющих трассы подводной роботизированной транспортной системы / Е. В. Дементьев, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ: научный журнал № 9(292) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – С. 25–31.

10. Ключин, О. С. Устройство выравнивания давления в герметичном корпусе автономного устройства / О. С. Ключин; патент RU2764323C1. – 2022. – Режим доступа: <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=31fe6f81ee122afaedabb4ea71cd1ea>.

11. Ормонд, М. Д. Пассивный подводный компенсатор с компенсацией глубины для морской воды / Мэттью Джейк Ормонд; патент Норвегия NO20101557L. – 2010. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/NO343210B1/en>.

12. Глубинная компенсация пассивного подводного качения // Патент США 7934561. InterMoor, Inc. – 2011. – Режим доступа: <https://www.freepatentsonline.com/7934561.html>.

### REFERENCES

1. Ageyev, M. D. Autonomous Underwater Robots: Systems and Technologies / M. D. Ageyev, A. V. Inzartsev, L. V. Kiselev [et al.]; ed. M. D. Ageyev; Russian Academy of Sciences, Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. – M.: Nauka, 2005. – 398 p.
2. Kozhemyakin, I. V. Development Trends and Applications of Underwater Gliders / I. V. Kozhemyakin, M. L. Rostrosa // Proceedings of the Krylov State Research Center. – 2018. – Vol. 2. Iss. 384. – Pp. 135–144.
3. Shurygin, V. A. Technology of using underwater walking robotic platforms in the development of underwater (subglacial) hydrocarbon deposits / V. A. Shurygin, V. A. Serov, I. V. Kovshov, S. A. Ustinov // VII all-Russian Scientific and Technical Conference “Technical Problems of World Ocean Development” (October 2–6, 2017): Conf. Proc. / FANO Russian Federation, Russian Foundation for Basic Research (grant No. 17-08-20517), Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. – Vladivostok, 2017. – Pp. 43–47.
4. Kiselev, L. V. Underwater robotic systems: systems, technologies, applications / L. V. Kiselev, A. V. Inzartsev, Yu. V. Matvienko [et al.]; ed. L. V. Kiselev. – Vladivostok: Dal'nauka, 2018. – 368 p.
5. Timofeev, I. P. Walking machines for the development of seabed resources / I. P. Timofeev. – L.: LGI, 1987. – 176 p.
6. Okhotsimsky, D. E. Walking machines / D. E. Okhotsimsky, A. K. Platonov, A. A. Kirilchenko, V. V. Lapshin //

Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of the USSR Academy of Sciences, 1989. – 36 p.

7. *Demytyev, E. V.* Method of underwater movement of cargo / E. V. Demytyev, E. S. Briskin, A. E. Gavrilov. Patent RU2829977C1. VSTU. – 2025.

8. *Demytyev, E. V.* Underwater track for cargo transportation / E. V. Demytyev, E. S. Briskin, A. E. Gavrilov. Patent RU231713U1. VSTU. – 2024.

9. *Demytyev, E. V.* On the spatial orientation of the track guides of the underwater robotic transport system / E. V. Demytyev, E. S. Briskin // Izvestiya of VSTU. – 2024. – Vol. 9. Iss. 292. – Pp. 25–31.

10. *Klyunin, O. S.* Device for equalizing pressure in the sealed housing of an autonomous device: / O. S. Klyunin. Patent RU2764323C1. – 2022. – URL: <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?facesredirect=true&id=31fe6f81eea122afaedabb4ea71cd1ea>.

11. *Ormond, M. J.* Passive underwater compensator with depth compensation for seawater / Matthew Jake Ormond. Patent Norway NO20101557L. – 2010. – URL: <https://patents.google.com/patent/NO343210B1/en>.

12. Depth compensation of passive underwater rolling // Patent USA US7934561. InterMoor, Inc. – 2011. – URL: <https://www.freepatentsonline.com/7934561.html>.

Статья поступила в редакцию 16.02.2026, доработана 28.02.2026, подписана в печать 16.03.2026

The article was submitted 16.02.2026, revised 28.02.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 007.52

DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-17-25

Научная статья

Original article

*И. П. Курочкин<sup>1</sup>, А. В. Ключиков<sup>1</sup>, Н. Е. Самохин<sup>2</sup>*

## СЕМАНТИЧЕСКАЯ СЕТЬ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ СЕРВИСНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ УБОРКИ ТЕРРИТОРИЙ

<sup>1</sup> Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии  
и инженерии им. Н. И. Вавилова, г. Саратов, Россия

<sup>2</sup> ООО «1Т», Москва, Россия

✉ Аркадий Викторович Ключиков, [krok9407@mail.ru](mailto:krok9407@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены существующие наработки, прототипы и реализуемые роботы-уборщики. Проведена классификация моделей сервисных бытовых и промышленных роботов-уборщиков. Выбраны типовые параметры для разделения роботов на отдельные группы, а также общий набор характеристик. Определены уникальные характеристики и диапазоны значений внутри каждой группы. Создана семантическая схема на основе описания групп роботов-уборщиков. Предложена собственная модель робота-уборщика.

**Ключевые слова:** агроробототехника, робот-уборщик, зернохранилища, семантическая сеть

**Финансирование:** работа выполнена в рамках гранта Фонда содействия инновациям (договор № 1496ГССС15-Л/88180 от 07.09.2023 г.).

**Для цитирования:** Курочкин И. П., Ключиков А. В., Самохин Н. Е. Семантическая сеть предметной области применения мобильных сервисных роботов для уборки территорий. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 17–25. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-17-25.

### Информация об авторах:

**Игорь Павлович Курочкин** – аспирант кафедры «Цифровое управление процессами в АПК», Вавиловский университет

<https://orcid.org/0009-0004-1210-0575>

e-mail: [igorpavkur@yandex.ru](mailto:igorpavkur@yandex.ru)

**Аркадий Викторович Ключиков** – доцент, канд. техн. наук, и. о. заведующего кафедрой «Цифровое управление процессами в АПК», Вавиловский университет

<https://orcid.org/0000-0002-8657-6486>

e-mail: [krok9407@mail.ru](mailto:krok9407@mail.ru)

**Никита Евгеньевич Самохин** – инженер-программист, ООО «1Т»

<https://orcid.org/0000-0001-7998-7079>

e-mail: [nikitasamokhin123@yandex.ru](mailto:nikitasamokhin123@yandex.ru)

### Вклад авторов:

**И. П. Курочкин** – проведение литературного обзора, патентный анализ, поиск источников и выявление аналогов.

**А. В. Ключиков** – системный анализ предметной области, составление семантической сети.

**Н. Е. Самохин** – определение характеристик и их принадлежности к группам роботов, а также выявление диапазона варьирования этих характеристик.

*I. P. Kurochkin<sup>1</sup>, A. V. Kliuchikov<sup>1</sup>, N. E. Samokhin<sup>2</sup>*

**SEMANTIC NETWORK OF THE SUBJECT AREA OF MOBILE SERVICE ROBOTS FOR CLEANING TERRITORIES**

<sup>1</sup> Vavilov University, Saratov, Russia

<sup>2</sup> LLC 1T, Moscow, Russia

✉ Arkadii V. Kliuchikov, krok9407@mail.ru

**Abstract.** Existing developments, prototypes, and implemented cleaning robots are reviewed. A classification of models of service domestic and industrial cleaning robots has been conducted. Typical parameters for dividing robots into separate groups, as well as a common set of characteristics, have been selected. Unique characteristics and value ranges within each group have been determined. A semantic scheme based on the description of the groups of cleaning robots has been created. An original model of a cleaning robot is proposed.

**Keywords:** agricultural robotics, cleaning robot, granary cleaning, semantic network

**Funding:** the reported study was funded by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises (FASIE, contract No. 1496ГССС15-L/88180).

**For citation:** Kurochkin I. P., Kliuchikov A. V., Samokhin N. E. Semantic network of the subject area of mobile service robots for cleaning territories. *Izvestiya VSTU*. 2026; 4(311): 17–25. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-4-311-17-25.

**Information about the authors:**

**Igor P. Kurochkin** – Postgraduate Student of the Department of digital process control in the Agro-Industrial Complex, Vavilov University

<https://orcid.org/0009-0004-1210-0575>

e-mail: igorpavkur@yandex.ru

**Arkadii V. Kliuchikov** – Cand. Sc. (Engineering), Acting Head of the Department of Digital Process Control in the Agro-Industrial Complex, Vavilov University

<https://orcid.org/0000-0002-8657-6486>

e-mail: krok9407@mail.ru

**Nikita E. Samokhin** – Software Engineer, 1T LLC.

<https://orcid.org/0000-0001-7998-7079>

e-mail: nikitasmokhin123@yandex.ru

**Contribution of the authors:**

**Igor P. Kurochkin** – conducting a literature review, patent analysis, searching for sources and identifying analogues.

**Arkadii V. Kliuchikov** – system analysis of the subject area, compiling a semantic network.

**Nikita E. Samokhin** – determining the characteristics and their belonging to groups of robots, as well as identifying the range of variation of these characteristics.

**Введение**

Указом Президента Российской Федерации от 28.02.2024 г. № 145 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» установлены приоритеты и перспективы научно-технического развития [1]. В стратегию входит п. № 21а о переходе к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении интеллектуальных производственных решений, роботизированных и высокопроизводительных вычислительных систем. Внедрение роботизированных систем направлено на решение проблемы дефицита квалифицированных специалистов. Актуальность использования сервисных роботов в различных отраслях экономики представили в докладе сотрудники аналитического агентства RoboJobs [2], где отражена карта российского рынка сервисной робототех-

ники. Авторы собрали 463 компании, которые по состоянию на октябрь 2024 г. разрабатывают, производят и интегрируют сервисных роботов для бизнеса. В этот сегмент не входят промышленные роботы-манипуляторы и роботы для персонального использования.

Одно из направлений автоматизации в агропромышленной отрасли связано с необходимостью поддержания условий безопасного хранения пищевой продукции на территории складских помещений [3]. Исходя из доктрины продовольственной безопасности ВФ [4] в зернохранилищах необходимо обеспечивать соблюдение требований технического регламента Таможенного союза «О безопасности зерна» [5] к процессам загрузки, хранения и уборки зерна: доступность поверхностей; обработка зерна, в т. ч. сушка, очистка и обеззараживание; должны обеспечиваться условия пожаробезопасности.

Указанные требования способны обеспечить мобильные автономные робототехнические системы со специализированным оборудованием для санитарной очистки и подготовки территории к отгрузке и хранению зерновой продукции.

Актуальность задачи подтверждает статистические данные – например, по состоянию на 2023 г. объем рынка роботов-уборщиков составил \$ 13,42 млрд. Ожидается, что рынок роботов-уборщиков ежегодно будет расти в среднем на 22 %. В качестве факторов, способствующих развитию отрасли, называют: замену роботом человека; возможность использования в неудобных и труднодоступных местах, например, при мойке окон, уборке бассейнов; внедрение систем «умный дом» [6].

#### Анализ предметной области

В зависимости от области применения и задач роботизированные системы, предназначенные для автоматической уборки [7], можно разделить на 3 основные группы: бытовые, промышленные и уличные роботы-уборщики. Каждая из этих категорий ориентирована на решение специфических задач – от ежедневной уборки в жилых помещениях до масштабной очистки городских территорий и производственных площадей.

Для систематизации предметной области роботов-уборщиков выявлены основные группы и критерии, по которым их можно классифицировать.

1. Одним из критериев разделения между моделями является способ уборки. Основной функционал роботов-уборщиков – очистка территории. Большинство роботов поддерживают сухую и влажную уборку. При сухой уборке робот собирает пыль и мусор с применением щеток и всасывающего механизма. Бытовые, промышленные и уличные роботы отличаются мощностью всасывающего механизма, количеством щеток для подметания и емкостью бака для мусора [8, 9]. При влажной уборке робот моет поверхность водой со специальным раствором. Также существуют специальные бытовые роботы, например, для мойки окон. Бытовые роботы и поломочные машины совмещают оба режима: первые ориентированы на легкую влажную протирку, вторые – на глубокую мойку с химическими средствами [10]. У поломочных роботов есть 2 основных типа уборки:

- в первый бак робота заливается чистая вода и химикаты, а второй заполняется по мере

уборки отработанной водой. Недостатком системы является меньшая автономность из-за ограниченного запаса воды в баке;

- отработанная вода проходит через несколько систем фильтрации и попадает снова в общий резервуар для вторичного применения. Недостаток системы – загрязнение фильтров, которые необходимо промывать вручную.

2. Следующим критерием классификации является уровень автоматизации, что обеспечивает степень автономности и интеллектуализации системы:

- низкий – характеризуется выполнением простых запрограммированных паттернов движения и минимальной адаптацией к среде; для ориентации используются датчики столкновения и падения. Такой подход требует постоянного контроля и частого вмешательства оператора. Преимущественно управление осуществляется с кнопки на устройстве;

- средний – имеется навигация на основе SLAM, построение карты, систематическое покрытие площади, объезд препятствий, автоматический возврат на базу, управление через приложение (запуск, зоны, расписание). Средний уровень автоматизации обеспечивает интеллектуальное управление в рутинных задачах, но ограниченный отклик и адаптацию к изменениям среды или нестандартным загрязнениям;

- высокий – роботы этой категории имеют интеллектуальную навигацию в сложной/динамической среде. В систему интегрируются данные от множества сенсоров: лидары, камеры, радары, GPS. На бортовом компьютере реализуется адаптивное планирование маршрутов в реальном времени, а также автоматическое обнаружение, классификация и целенаправленная обработка типов загрязнений. Возможна оптимизация ресурсов (вода, химия, энергия) на основе анализа задачи и среды. Высокая степень автоматизации обеспечивает минимальное вмешательство оператора (требуется обслуживание и решение критических нештатных ситуаций), а система управления реализуется через стратегическое наблюдение и корректировку задач в продвинутых пользовательских интерфейсах.

Исходя из степени автоматизации можно выделить отдельные критерии классификации по способу навигации и управления. В контексте трех основных групп бытовые (поломочные) и промышленные роботы строят карту в замкнутом пространстве, а уличные при нави-

гации могут опираться на данные, получаемые через GPS. Большинство роботов работают в автономном режиме по заранее написанным алгоритмам, ориентируясь в пространстве с применением данных, полученных с датчиков. Некоторыми моделями можно управлять через фирменные мобильные приложения, но функционал может отличаться. Например, в бытовых роботах-уборщиках можно через приложение указать на сохраненной карте, какую зону необходимо убрать. Также бытовые роботы-уборщики интегрируются с системой умного дома и голосовыми помощниками.

Рассмотрим принадлежность трех основных групп роботов-уборщиков ко второму критерию:

*А.* Бытовые роботы-уборщики ориентированы на удобство пользователя. Пылесосы демонстрируют преимущественно средний уровень (редко низкий) автоматизации. Используют SLAM для навигации, строят карты, запоминают планировку, обходят препятствия и автоматически возвращаются на базу [11]. Управление осуществляется через мобильные приложения, пользователь может задать расписание уборки, зоны, режимы [12, 13]. Однако адаптивность к качеству загрязнений находится на низком уровне. Роботы следуют заложенным паттернам без поиска и анализа загрязнения. Обнаружение основано на косвенных признаках (сопротивление щетки), без визуального анализа. В роботах с низким уровнем автоматизации отсутствуют ряд датчиков и функций, а управление происходит через кнопки на устройстве. Такие роботы и мойщики окон двигаются по заранее прописанной траектории (например, зигзагом) [14]. Управление реализуется через приложение или пульт, а вмешательство требуется для освобождения и обслуживания. Отдельной группой среди бытовых являются поломочные роботы для ТЦ и магазинов. Они обладают высоким уровнем автоматизации процессов уборки, особенно в адаптивности к окружающей среде. Система управления реализует продвинутую SLAM-навигацию по большим открытым пространствам. Особенностью является система предиктивной и адаптивной уборки на основе компьютерного зрения. Такие роботы автоматически обнаруживают и классифицируют жидкости, грязь, следы и целенаправленно обрабатывают локальные загрязнения. Системы управления поломочниками – гибридные, персонал использует приложения для запуска и мониторинга, но решение по уборке принимает сам робот на основе анализа среды

[15]. Также у этих устройств имеется возможность ручного управления оператором [16].

*В.* Промышленные роботы для уборки складов и производств достигают среднего и высокого уровней автоматизации процессов уборки в части навигации и выполнения задачи. Они применяют навигацию SLAM и 3D-камеры в сложной, но структурированной среде, точно следуют заданным маршрутам, интегрируются с инфраструктурой (автоматические двери и лифты) и могут автоматически обслуживаться, вставая на зарядку или выгрузку мусора у док-станции. Управление роботами на производствах осуществляется через промышленные интерфейсы [17] и web-панели, интегрированные с BMS/WMS, что позволяет удаленно контролировать робота, задавать графики и зоны обслуживания. Однако их адаптивность к непредвиденным загрязнениям ограничена. Работа сфокусирована на покрытии заданной территории по графику, а не на интеллектуальном обнаружении и точечной обработке грязи.

*С.* Уличные роботы-уборщики (РТК) обладают высоким уровнем автоматизации базовых процессов навигации и уборки в экстремально сложных условиях, но средним уровнем автоматизации в адаптивности к загрязнениям. Их автоматизация фокусируется на навигации с использованием GPS, лидаров, радаров и камер для работы в любую погоду, среди динамических препятствий (люди, транспорт) и на сложном рельефе. Роботы способны автономно следовать сложным маршрутам, объезжать препятствия, автоматически обслуживаться на станциях. Однако у них нет автоматического обнаружения и классификации типов уличных загрязнений (разливы, осколки, листва, снег). Преимущественно РТК передвигаются по запланированным паттернам или реагируют на заранее заданные зоны. Управление требует централизованной диспетчеризации. Операторы удаленно контролируют робота, стратегически планируют глобальные маршруты с учетом ряда факторов (погода, события, трафик), оперативно перенаправляют роботов и контролируют безопасность.

3. Следующий критерий – среди роботов-уборщиков существуют различные комплектации по электропитанию системы и способу их зарядки. В случаях проведения длительных работ в некоторых моделях предусматривается функция автоматической подзарядки. Для этого может применяться зарядная станция. У бытовых и промышленных роботов преимущест-

венно используются автоматические зарядные станции, однако есть модели, требующие ручной подзарядки. Такой подход также применяется в уличных уборщиках. Некоторые зарядные станции оснащены функциями сбора мусора, слива отработанной воды, заправки чистой водой и химическими реагентами.

4. К критерию безопасности относится защита робота, а также окружающих от него и последствий его работы. Защита от столкновений обеспечивается применением датчиков расстояния, касания и камеры с компьютерным зрением для определения статических и динамических препятствий. Уличные и полумоечные роботы должны быть оснащены пыле- и влагозащитой для чувствительных элементов и аппаратных частей. Промышленные уборщики также должны соответствовать этим стандартам и дополнительным стандартам защиты в зависимости от производства, на котором убирается робот (например, взрывобезопасность).

5. Также роботы могут использоваться на территориях с различными особенностями и ограничениями. Например, промышленные, полумоечные и бытовые роботы-уборщики работают в закрытых помещениях. Однако для них отличаются объемы территории и тип покрытия.

*А.* Бытовые уборщики работают в квартирах и небольших офисах с ровным полом. Пользователь может задать с мобильного устройства зону уборки или ввести ограничения на перемещение. Такие ограничения указываются для обеспечения безопасности устройства, например, при уборке ванной комнаты. Полумоечные роботы убираются в торговых центрах, аэропортах, магазинах и школах с большой проходимостью людей. Тут гладкость поверхности важна, потому что роботы не имеют активной подвески, а сцепление щеток и тряпок с поверхностью должно быть максимальным.

*В.* Промышленный роботы убираются на территориях складских помещений и предприятий. Тип покрытия в таких зданиях: керамика, бетон, резина. Поверхность ровная с минимальными перепадами (не более 2–5 мм). Робот ориентируется по линии на полу, предназначенной для проезда спецтехники и перемещения сотрудников. Таким же образом обеспечивается зонирование на территории, чтобы робот не заезжал на территорию во время работы другой техники или на опасные участки.

*С.* Уличные роботы-уборщики работают на открытых территориях, например, улицы, парки, дворы и скверы. Тип покрытия – плитка из

камня, асфальтобетон, цементобетон, гравий, резиновое покрытие, деревянный настил. Поверхность может быть с неровностями и перепадами высот. Поэтому роботы должны иметь активную подвеску, а также амортизацию уборочного звена. Так как поверхность для перемещения может быть сыпучей, то конструктивно роботы оснащены колесами с большим диаметром (от 8 дюймов), а также протектором для повышения сцепления с поверхностью.

6. Все типы роботов-уборщиков требуют обслуживания, но в разной степени:

*А.* Бытовым роботам-уборщикам необходима очистка бака от мусора, заливка воды в емкость после каждой уборки. Человеку необходимо обслуживать зарядную станцию, очищать бак после нескольких циклов уборки, а также заправлять резервуар зарядной станции чистой водой.

*В.* Промышленным роботам необходима очистка бака от мусора, проводимая при заполнении бака. Замена фильтров проводится после нескольких циклов уборки. Обслуживание проводится вручную.

*С.* Полумоечные РТК обслуживаются человеком при очистке резервуара с отработанной водой, фильтров, а также при заправке чистой водой и бытовой химией. У робота может быть 2 типа системы уборки, и обслуживаются они по-разному:

- в первом случае у робота один бак и есть система фильтрации отработанной воды. Слив грязной воды проводится вручную и в автономном режиме на зарядной станции, совмещенной со станцией обслуживания;

- во втором случае у робота 2 бака для чистой и отработанной воды. Основное отличие – нет необходимости часто обслуживать фильтры, как в первом варианте.

*Д.* Уличных роботов-уборщиков необходимо заправлять водой и выгружать мусор из бака. Некоторые уличные роботы-уборщики могут в автономном режиме выгружать мусор. Однако преимущественно очистка бака и заправка чистой водой проходят в ручном режиме.

7. Роботы в зависимости от места их эксплуатации, типа поверхности, габаритов и целевой функции могут иметь различную колесную базу и кинематику движения.

*А.* Для бытовых роботов-уборщиков преимущественно распространены конфигурации с двумя ведущими колесами и одним опорным с круговым вращением по всем осям. Также колеса могут быть подпружинены (активная

подвеска) для проезда через плинтуса, пороги и стыки в полу.

Мойщики окон могут перемещаться по стеклу, используя две щетки и вращая их поочередно. Одновременно с уборкой реализуется механизм удержания с использованием пневматической системы всасывания.

В. У промышленных роботов-уборщиков также используются два ведущих колеса и опорные свободно направленные ролики или колеса. Такая конфигурация дает возможность роботу разворачиваться на месте, двигая пары колес в противоположные друг к другу направления (танковое управление).

С. Уличные роботы-уборщики имеют несколько типов колесных баз для перемещения:

1) двухколесная база с опорными роликами;

2) трехколесная база с двумя колесами для приведения робота в движение и одним для поворотного механизма;

3) четырехколесные уличные роботы могут иметь: полный привод с «танковым» поворотом; передний с поворотными задними колесами; шарнирно-сочлененную раму. Необходимы для перемещения по траве и снегу.

### Формализация семантической схемы роботов-уборщиков

На основании проведенного анализа существующих типов роботизированных средств для уборки создана семантическая схема (рис. 1). В ней роботы-уборщики разделены на 4 типа (бытовые, полумоечные, промышленные, уличные), а далее описаны их основные функции, в т. ч. отражены пересечения между типами.

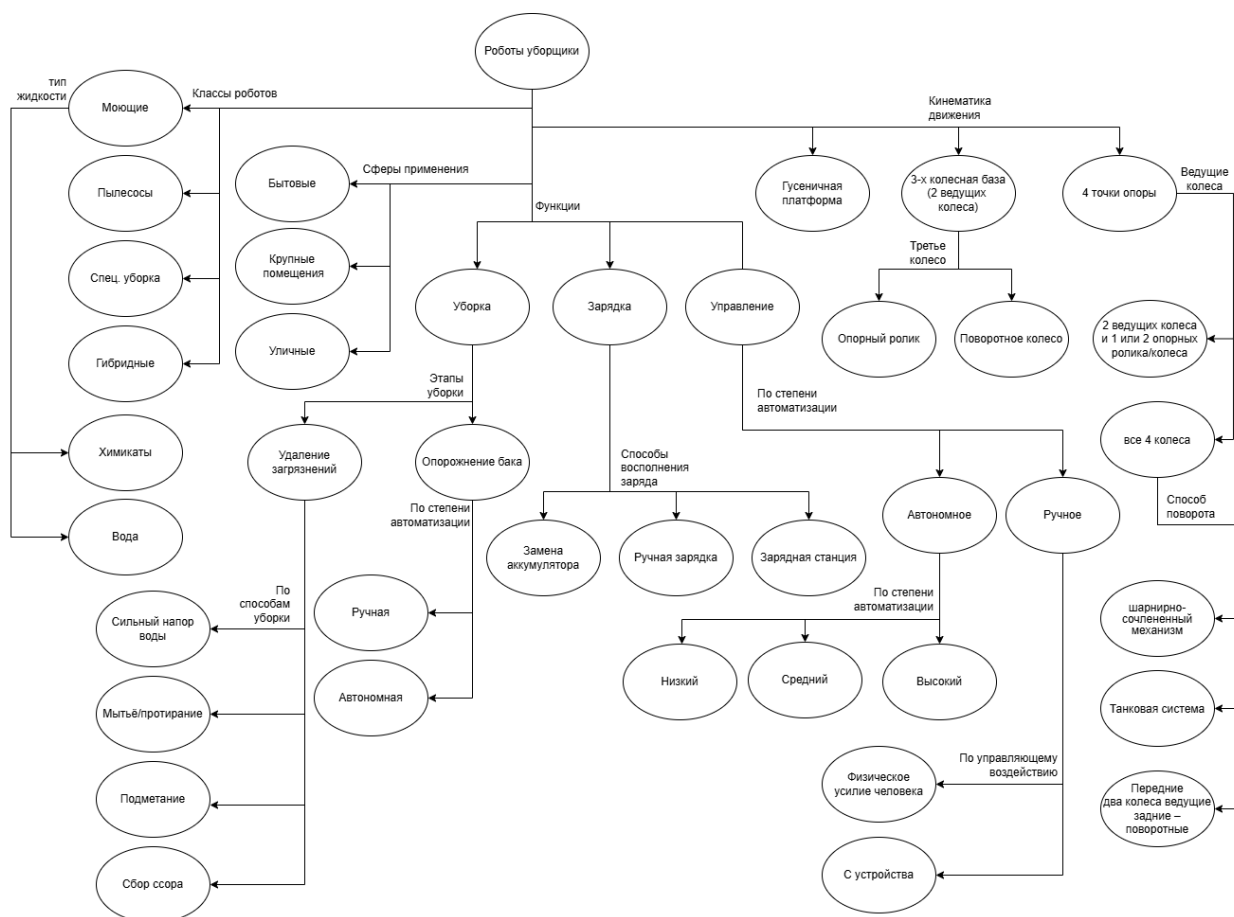


Рис. 1. Семантическая сеть роботов-уборщиков

Несмотря на широкое распространение роботов-уборщиков в различных отраслях агропромышленный комплекс до сих пор не имеет специализированных решений для автоматизации очистки зернохранилищ.

Чтобы восполнить этот пробел и решить

проблему с поиском персонала для уборки зернохранилищ на удаленной территории разрабатывается мобильный автономный робот-уборщик зернохранилищ («МАРУЗ»), адаптированный к условиям сельскохозяйственных объектов (рис. 2).

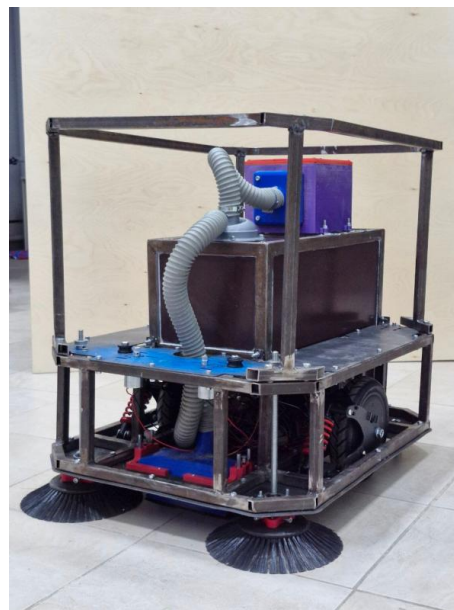


Рис. 2. Робот для уборки зернохранилищ

По семантической схеме роботов-уборщиков «МАРУЗ» относится к пылесосам. Он использует всасывающий механизм для забора мусора внутрь. Сфера применения – крупные помещения – зернохранилища и пищевые склады. Для сбора мусора используются передние щетки (подметание), затем осуществляется сбор сора с использованием всасывающего механизма. Опорожнение осуществляется автоматически. Для зарядки робота используется зарядная станция. Стыковка осуществляется с использованием ARUCO-меток для повышенной точности. Робот передвигается автоматически по карте, которая строится с использованием SLAM-алгоритмов. Для построения карты местности применяется инфракрасный датчик кругового обзора (лидар), собирающий облако точек. Для ориентации в пространстве используются IMU-сенсоры (гироскоп, акселерометр) и датчики холла на колеса. Степень автоматизации управления – средняя.

Робот «МАРУЗ» – инновационный РТК для агропромышленного комплекса. Разработка направлена на автоматизацию процесса уборки зернохранилищ. Робот имеет схожие по функционалу возможности как для промышленных, так и для уличных роботов-уборщиков. Роботу необходимо работать в запыленной и загрязненной опасными веществами среде, как и промышленным роботам-уборщикам. Как и уличным роботами-уборщикам разрабатываемому РТК приходится перемещаться по неровной поверхности. Также необходим бак большого объема.

«МАРУЗ» можно отнести к промышленным автономным роботам-уборщикам узкой специализации, адаптированным для работы в агропромышленных помещениях. Полная классификация соответствует названию «промышленный робот-уборщик (пылесос) с функцией подметания и сбора сора, для уборки в крупных помещениях, с автоматическим сбросом мусора и зарядкой, со средним уровнем автоматизации и возможностью управления через приложение».

#### Заключение

В рамках исследования разработана классификация роботов-уборщиков, разделяющая их на три категории на основе функциональных и эксплуатационных характеристик. Систематизация упрощает выбор оптимальных решений для конкретных задач.

Описаны степени автоматизации роботов-уборщиков, используемые методы и технологии для достижения разных степеней автоматизации. Представлены примеры сценариев, в которых применяется автоматизация роботов и описание решаемых задач.

Важным этапом исследования стало создание семантической схемы, обеспечивающей наглядное сравнение роботов по ключевым признакам. Применение схемы позволило определить категорию, к которой относится робот для очистки зернохранилищ. Установлено, что его конструкция и функционал соответствуют промышленным роботам-уборщикам, ориентированным на работу в условиях высокой запыленности, ограниченного пространства.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации / Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 // Официальный интернет-портал правовой информации; № 0001202402280003 от 28.02.2024. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003?ysclid=mn6ea07zbv791828265>.
2. Карта рынка сервисной робототехники России в 2024 году. ICT.Moscow – ИТ и телеком в Москве. – Режим доступа: <https://ict.moscow/static/181e9077-f4e8-50a8-827a-3f8a0190f9cb.pdf>.
3. Research on Key Technologies of Granary Clearing Robots / C. Xu [et al.] // 3rd International Symposium on Sensor Technology and Control / 2024. – Zhuhai, China, 2024. – Pp. 375–381. DOI: 10.1109/ISSTC63573.2024.10824071.
4. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации / Указ Президента РФ от 30.01.2010 № 120] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2010. – № 5. – 502 с.
5. О безопасности зерна : ТР ТС 015/2011 (изм. на 15.09.2017). – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902320395?ysclid=mn6eg0wh7w844128>.
6. Global residential robotic vacuum cleaner competitive landscape professional research report 2025 / Market Publishers. – Limassol : Market Publishers Ltd, 2025. – 165 p. – Режим доступа: <https://pdf.marketpublishers.com/diresearch/residential-robotic-vacuum-cleaner-research-report-dir.pdf>.
7. A short history of cleaning robots / E. Prassler [et al.] // Autonomous Robots. – 2000. – Vol. 9. Iss. 3. – Pp. 211–226.
8. Indoor and outdoor universal intelligent sweeping and washing integrated robot and cleaning method thereof. / Лю Чжиен, Ли Синлун, Нан Зею, У Ци, Фу Цзичжи, Чжан Сяосяо, Ван Яоин, Ма Сяоюй, Ань Байлинь. Patent CN111714037A. China. Beijing Zhenrobotics Technology Co Ltd. – 2020.
9. An AGV trolley with cleaning, cleaning and recycling functions. / Чжан Цзяньхуа, Ли Пэнбо, Мао Липэн, Лихуэй (Хой), Чжао Янь. Patent CN110714433A China. Hebei University of Technology. – 2020.
10. Intelligent water supply and drainage floor washing robot system and water supply and drainage control method thereof / Гао Яо, Тао Жунтао, Инь Чжаовэй, Чэнь Цзянь. Patent CN110584550A. China. Jiangsu Tianze Robot Technology Co Ltd. – 2019.
11. Cleaning robot and control method thereof / Jea Yun So, Sang Sik Yoon, Joon Hyung Kwon, Shin Kim. Patent EP 2801313 A3. European Patent Office. Samsung Electronics Co Ltd. – 2014.
12. Приложение Roborock. – Режим доступа: <https://roborock.com.ru/pages/roborock-app>.
13. МПК G06F 7/00. Робот-пылесос с функцией Wi-Fi / Ц. Лян. Патент 2831101 C1 Российская Федерация; АО «Астрата». – 2024.
14. Window Cleaning System with Water Circulation for Building Facade Maintenance Robot and Its Efficiency Analysis / Sung Min Moon, Chang Yeob Shin, Jaemyung Huh, Kyeong Won Oh, Daehie Hong // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2015. – Vol.2. – Pp. 65–72. DOI:10.1007/s40684-015-0009-8.
15. Small-size automatic floor cleaning robot and control system thereof / Тао Жунтао, Се Вэй, Чэнь Цзянь / Patent CN113017511A. China. Jiangsu Tianze Robot Technology Co Ltd. – 2019
16. Ван дер Лугт, С. How smart is the use of smart devices in the office? The case of industrial cleaning robots in

the Netherlands / С. Вандер Лугт, М. Бел. The Hague : Clingendael Institute, 2021. – 20 p. – Режим доступа: [https://www.clingendael.org/sites/default/files/2021-04/Report\\_Smart\\_devices\\_office\\_industrial\\_cleaning\\_April\\_2021.pdf](https://www.clingendael.org/sites/default/files/2021-04/Report_Smart_devices_office_industrial_cleaning_April_2021.pdf).

17. Робот-уборщик R2B mark-2 / Д. Д. Стоянов, В. В. Жеребцов, А. Е. Образцов. Патент на промышленный образец № 145570, РФ. ООО «Р2Б». – 2025.

## REFERENCE

1. Decree of the President of the Russian Federation No. 145 of February 28, 2024 On the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation. The official internet portal for legal information. Publication number: 0001202402280003. Publication date: 28.02.2024. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003?ysclid=mn6ea07zbv791828265>.
2. Market map of service robotics of Russia of 2024 year. ICT. Moscow – IT and telecom in Moscow. – URL: <https://ict.moscow/research/karta-rynka-servisnoi-robototekhniki-rossii-v-2024-godu/001202402280003?index=10>.
3. Research on Key Technologies of Granary Clearing Robots / C. Xu [et al.] // 3rd International Symposium on Sensor Technology and Control. 2024. – Zhuhai, China, 2024. – Pp. 375–381. DOI: 10.1109/ISSTC63573.2024.10824071.
4. Doctrine of Food Security of the Russian Federation: [approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 120 of 30.01.2010] // Sobranie Zakonodatel'stva Rossiiskoi Federatsii [Collection of legislation of the Russian Federation]. – 2010. – No. 5. – 502 p.
5. Technical Regulation of the Customs Union “On Grain Safety” (TR CU 015/2011) (version of 15.09.2017). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320395?ysclid=mn6eg0wh7w844128>.
6. Global Residential Robotic Vacuum Cleaner Competitive Landscape Professional Research Report 2025 / Market Publishers. – Limassol : Market Publishers Ltd, 2025. – 165 p. – URL: <https://pdf.marketpublishers.com/diresearch/residential-robotic-vacuum-cleaner-research-report-dir.pdf>.
7. A short history of cleaning robots / E. Prassler [et al.] // Autonomous Robots. – 2000. – Vol. 9. Iss. 3. – Pp. 211–226.
8. Indoor-outdoor universal intelligent sweeping and mopping integrated robot and its cleaning method / Liu Zhien, Li Xinlong, Nan Zeyu, Wu Qi, Fu Jizhi, Zhang Xiaoxiao, Wang Yaoying, Ma Xiaoyu, An Bailin; patent CN111714037A. China. Beijing Zhenrobotics Technology Co Ltd. – 2020.
9. AGV trolley with cleaning, mopping, and recycling functions / Zhang Jianhua, Li Pengbo, Mao Lipeng, Li Hui, Zhao Yan; patent CN110714433A. China. Hebei University of Technology. – 2020.
10. Intelligent water supply and drainage floor washing robot system and its water supply and drainage control method / Gao Yao, Tao Rongtao, Yin Zhaowei, Chen Jian; patent CN110584550A. China. Jiangsu Tianze Robot Technology Co Ltd. – 2019.
11. Cleaning robot and control method thereof / Jea Yun So, Sang Sik Yoon, Joon Hyung Kwon, Shin Kim; patent EP 2801313 A3. European Patent Office. Samsung Electronics Co Ltd. – 2014.
12. Prilozhenie Roborock [Roborock Application]. Roborock Russia. – URL: <https://roborock.com.ru/pages/roborock-app>.
13. IPC G06F 7/00. Vacuum cleaner robot with Wi-Fi function / C. Liang; Joint Stock; Patent № 2831101 C1 Russian Federation, LLC Astrata. – 2023.
14. Window Cleaning System with Water Circulation for Building Facade Maintenance Robot and Its Efficiency Analysis / Sung Min Moon, Chang Yeob Shin, Jaemyung Huh,

Kyeong Won Oh, Daehie Hong // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2015. – Vol. 2. – Pp. 65–72. DOI:10.1007/s40684-015-0009-8.

15. Compact automatic floor cleaning robot and its control system / Tao Rongtao, Xie Wei, Chen Jian; patent CN113017511A. China. Jiangsu Tianze Robot Technology Co Ltd. – 2021.

16. *Van der Lugt, S.* How smart is the use of smart devices

in the office? The case of industrial cleaning robots in the Netherlands / S. Van der Lugt, M. Bel. – The Hague : Clingendael Institute, 2021. – 20 p. – URL: [https://www.clingendael.org/sites/default/files/2021-04/Report\\_Smart\\_devices\\_office\\_industrial\\_cleaning\\_April\\_2021.pdf](https://www.clingendael.org/sites/default/files/2021-04/Report_Smart_devices_office_industrial_cleaning_April_2021.pdf).

17. Cleaning robot R2B mark-2 / D.D. Stoyanov, V.V. Zhe-rebtsov, A.E. Obratsov; Industrial Design Patent No. 145570 Russian Federation. LLC R2B. – 2025.

Статья поступила в редакцию 02.03.2026, доработана 10.03.2026, подписана в печать 16.03.2026

The article was submitted 02.03.2026, revised 10.03.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 621.865.8+62-503.5  
DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-25-31

Научная статья  
Original article

*А. В. Нелюбова, В. В. Жога, Р. В. Крайнов, В. В. Николаева*

### ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ УСИЛИЙ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Анна Васильевна Нелюбова, [mqdschen@yandex.ru](mailto:mqdschen@yandex.ru)

**Аннотация.** Описывается алгоритм формирования управляющих усилий приводов манипулятора параллельно-последовательной структуры, выполняющего обработку поверхности при перемещении инструмента по пространственной прямой с постоянной скоростью.

**Ключевые слова:** манипулятор параллельно-последовательной структуры, механическая обработка поверхности

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 25-21-00902, <https://rscf.ru/project/25-21-00902>).

**Для цитирования:** Нелюбова А. В., Жога В. В., Крайнов Р. В., Николаева В. В. Динамическое моделирование управляющих усилий манипулятора параллельно-последовательной структуры при механической обработке поверхностей. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 25–31. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-25-31.

#### Информация об авторах:

**Анна Васильевна Нелюбова** – аспирант кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

<https://orcid.org/0009-0001-8825-8545>

e-mail: [mqdschen@yandex.ru](mailto:mqdschen@yandex.ru)

**Виктор Викторович Жога** – профессор кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-8345-7385>

e-mail: [viczhoga@gmail.com](mailto:viczhoga@gmail.com)

**Родион Викторович Крайнов** – аспирант кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

e-mail: [rodikray@mail.ru](mailto:rodikray@mail.ru)

**Валерия Владимировна Николаева** – магистрант кафедры «Автоматизация производственных процессов», ВолгГТУ

e-mail: [nikolaeva.lera12@gmail.com](mailto:nikolaeva.lera12@gmail.com)

#### Вклад авторов:

**А. В. Нелюбова** – определение цели работы, обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

**В. В. Жога** – разработка метода решения задачи.

**Р. В. Крайнов** – разработка кода программы, обработка и анализ результатов исследования.

**В. В. Николаева** – обработка и анализ результатов исследования, участие в обсуждении результатов.

*A. V. Nelyubova, V. V. Zhoga, R. V. Krainov, V. V. Nikolaeva*

**DYNAMIC MODELING OF MANIPULATOR OF A PARALLEL-SEQUENTIAL  
STRUCTURE CONTROL FOR MECHANICAL SURFACE TREATMENT**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Anna V. Nelyubova, mqschen@yandex.ru

**Abstract.** The paper describes an algorithm for forming the control forces of the drives of a manipulator of a parallel-sequential structure that performs surface treatment when moving the tool in a straight line at a constant speed.

**Keywords:** manipulator of parallel-sequential structure, mechanical surface treatment

**Funding:** the research was funded by a grant from the Russian Science Foundation (No. 25-21-00902, <https://rscf.ru/project/25-21-00902>).

**For citation:** Nelyubova A. V., Zhoga V. V., Krainov R. V., Nikolaeva V. V. Dynamic modeling of manipulator of a parallel-sequential structure control for mechanical surface treatment. *Izvestiya VSTU*. 2026; 4(311): 25–31. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-4-311-25-31.

**Information about the authors:**

**Anna V. Nelyubova** – Postgraduate Student, Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU

<https://orcid.org/0009-0001-8825-8545>

e-mail: mqschen@yandex.ru

**Victor V. Zhoga** – D. Sc. (Phys.-Math), Professor of the Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-8345-7385>

e-mail: viczhoga@gmail.com

**Rodion V. Krainov** – Postgraduate Student of the Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU

e-mail: rodikray@mail.ru

**Valeria V. Nikolaeva** – Master's student of the Department of Automation of Manufacturing Processes, VSTU

e-mail: nikolaeva.lera12@gmail.com

**Contribution of the authors:**

**Anna V. Nelyubova** – defining the aim of the work, processing and analysis of the research results, writing the text of the article.

**Victor V. Zhoga** – development of a method for solving the problem.

**Rodion V. Krainov** – defining the aim of the work, processing and analysis of the research results, drafting the article.

**Valeria V. Nikolaeva** – conducting experiments, processing and analysis of the research results, participation in the discussion of the results.

**Введение**

В современном промышленном производстве манипуляторы все чаще используются не только для погрузочно-разгрузочных и вспомогательных работ, но и активно применяются для проведения отдельных технологических операций, таких как фрезерная обработка, шлифование, сверление, а также работ по очистке поверхностей, удалению загрязнений и нанесению лакокрасочных покрытий.

Манипуляционные системы позволяют повысить точность выполняемых операций и обеспечить безопасность оператора [1]. Высокая функциональность манипулятора достигается благодаря высокой скорости обработки и реализации сложных траекторий. Существенными недостатками применения манипуляторов, выполненных на основе последовательной структуры, являются недостаточная жесткость металлоконструкции и невысокая точность по-

зиционирования инструмента, которые влияют на точность обработки.

Для задач механической обработки могут использоваться манипуляторы параллельно-последовательной структуры [2, 3]. Особенность таких механизмов заключается в том, что они обладают высокой жесткостью механической системы, малой металлоемкостью, что позволяет обеспечить требуемую точность позиционирования рабочего инструмента при высокой скорости перемещения и сохранить достаточно большое рабочее пространство манипулятора.

Цель работы заключается в разработке алгоритмов формирования управляющих усилий приводов манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью при перемещении рабочего инструмента в процессе контакта с обрабатываемой поверхностью по заданной траектории и закону, обеспечивающим заданное усилие в месте контакта.

**Математическая модель манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью**

В качестве объекта исследования рассматривается манипулятор параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью [4, 5] (рис. 1). Основу его механизма представляет трипод, состоящий из трех звеньев переменной длины 1–3, закрепленных с помощью двухстепенных шарниров на основании ABC. Другие концы трех звеньев закреплены с помощью сферических шарниров на выходном звене 6. Жесткость металлоконструкции манипулятора обеспечивается с помощью металлической трубы 5, которая компенсирует вибрации и изгибающие моменты в процессе меха-

нической обработки. Увеличенное рабочее пространство манипулятора достигается за счет последовательно соединенного четвертого звена переменной длины 4 с параллельной частью манипулятора. Четвертый линейный привод 4 обеспечивает поворот основания ABC вокруг горизонтальной оси. Манипулятор имеет четыре степени подвижности.

Конструкция механизма манипулятора описывается четырьмя обобщенными координатами: длиной отрезка трубы  $q_1 = KM(t) = L(t)$ ; углами  $q_2 = \psi(t)$ ;  $q_3 = \delta(t)$  и углом поворота основания ABC манипулятора  $q_4 = \varphi(t)$ . Управление движением манипулятора происходит под действием движущих сил  $F_s(t)$ ,  $s = 1, 2, 3, 4$ , действующих со стороны штоков электроактуаторов (см. рис. 1).

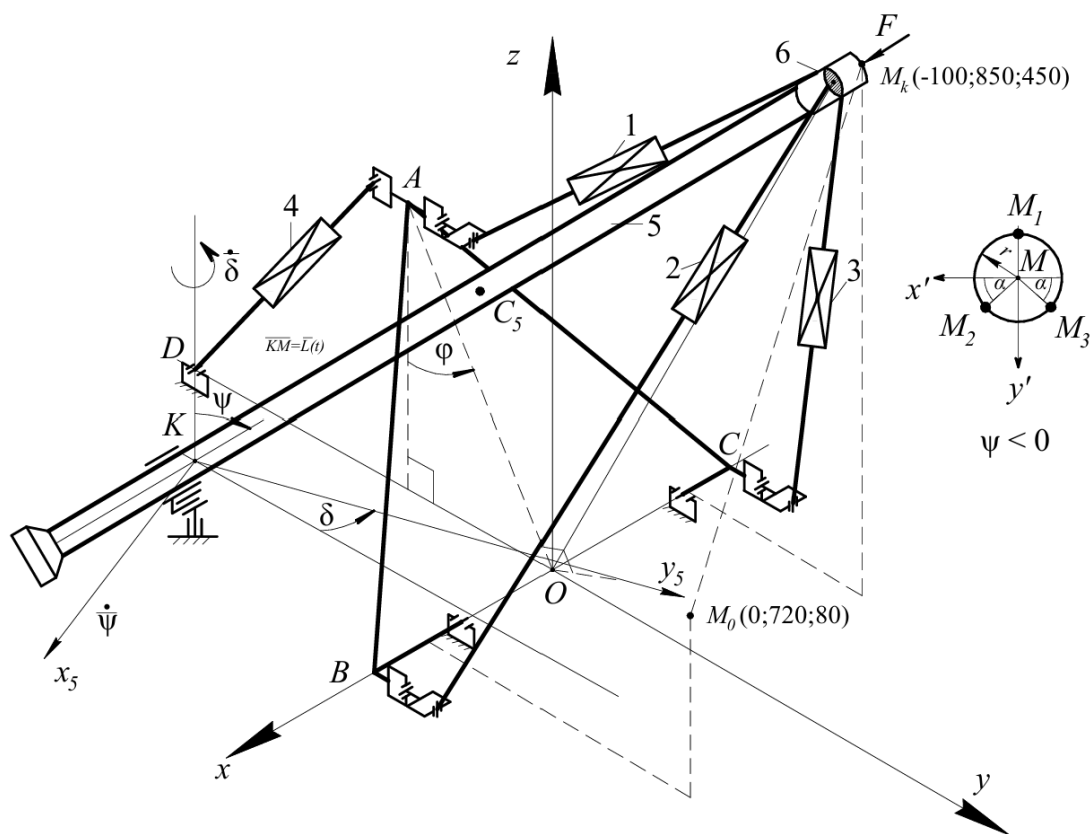


Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора:  
1, 2, 3, 4 – линейные актуаторы; 5 – направляющая труба; 6 – выходное звено

Рассматривается перемещение точки M крепления инструмента по пространственной прямой по закону  $S(t) = Vt$  из точки  $M_0(x_0, y_0, z_0)$  в точку  $M_k(x_k, y_k, z_k)$ .

Со стороны обрабатываемой поверхности на точку M манипулятора действует сила F.

Декартовы координаты точки приложения силы вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} x_M(t) &= x_0 + S(t)K_x, \\ y_M(t) &= y_0 + S(t)K_y, \\ z_M(t) &= z_0 + S(t)K_z, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 K_x &= \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}}, & \Delta x &= (x_k - x_0), \\
 K_y &= \frac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}}, & \Delta y &= (y_k - y_0), \\
 K_z &= \frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}}, & \Delta z &= (z_k - z_0).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Решение прямой задачи кинематики имеет вид (см. рис. 1):

$$\begin{aligned}
 x_M &= L(t) \sin \psi \sin \delta, \\
 y_M &= -OD - L(t) \sin \psi \cos \delta, \\
 z_M &= -DK + L(t) \cos \psi.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Решение обратной задачи кинематики имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \psi(t) &= \arctg \left( -\frac{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}}{(z_M + DK)} \right), & \delta(t) &= \arctg \left( -\frac{x_M}{y_M + OD} \right), \\
 L(t) &= \sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2 + (z_M + DK)^2}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Уравнения, связывающие обобщенные координаты манипулятора  $L$ ,  $\psi$ ,  $\delta$ ,  $\varphi$  с длинами исполнительных звеньев  $l_1, l_2, l_3, l_4$  [6]:

$$\begin{aligned}
 l_1^2(t) &= L^2(t) + (OD)^2 + (DK)^2 + r^2 + (OA)^2 + 2OA(DK \cos \varphi - OD \sin \varphi) + \\
 &+ 2OD \cdot L(t) \sin \psi \cos \delta - 2 \cos \psi (DK \cdot L(t) - rOD \cos \delta) - \\
 &- 2OA \sin \varphi \cos \delta (r \cos \psi + L(t) \sin \psi) + 2DKr \sin \psi + \\
 &+ 2OA \cos \varphi (r \sin \psi - L(t) \cos \psi)
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 l_2^2 &= L^2 + OB^2 + OD^2 + DK^2 + r^2 - 2DK(L \cos \psi + r \sin \psi \sin \alpha) - \\
 &- 2r \cos \alpha (OB \cos \delta + OD \sin \delta) + \\
 &+ 2(OB \sin \delta - OD \cos \delta)(r \cos \psi \sin \alpha - L \sin \psi),
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 l_3^2 &= L^2 + OC^2 + OD^2 + DK^2 + r^2 - 2DK(L \cos \psi + r \sin \psi \sin \alpha) + \\
 &+ 2r \cos \alpha (OD \sin \delta - OC \cos \delta) + 2(OC \sin \delta + OD \cos \delta)(L \sin \psi - r \cos \psi \sin \alpha),
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$l_4^2 = OD^2 + OA^2 - 2OD \cdot OA \sin \varphi. \tag{9}$$

Для описания движения манипулятора используются дифференциальные уравнения с учетом сил реакции  $F$  используемой системы нелинейных дифференциальных уравнений с учетом сил реакции  $F$  обрабатываемой поверхности [7]:

$$\begin{aligned}
 &\left( 0,17 - \frac{0,14}{\pi} \varphi \right) \ddot{\varphi} - \frac{0,07}{\pi} \dot{\varphi}^2 + \mu_1 \dot{\varphi} = \\
 &= -\frac{OA}{l_1} \left[ DK \sin \varphi + OD \cos \varphi + L \cos \varphi \sin \psi \cos \delta + r \cos \varphi \cos \psi \cos \delta + \right] F_1 - \\
 &- \frac{OD \cdot OA \cos \varphi}{l_4} F_4 + m_{42} g \frac{OA^2 OD \cos^2 \varphi}{l_4^2} + \frac{1}{3} m_{BC} g OA \sin \varphi - \\
 &- [m_{41} l_{c4} + m_{42} (l_4 - l_{40} + z_{c04})] \cdot \left[ \frac{OA^2 OD \cos^2 \varphi}{l_4^3} - \frac{OA \sin \varphi}{l_4} \right] g + Q_\varphi,
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 & m_5 \ddot{L} - m_5 (L - L_0 + z_{c05}) \cdot (\dot{\delta}^2 \sin^2 \psi + \dot{\psi}^2) + \mu_2 \dot{L} = \\
 & = \frac{L + OD \cdot \sin \psi \cos \delta - OA \cdot \sin \varphi \sin \psi \cos \delta - DK \cdot \cos \psi - OA \cos \psi \cos \varphi}{l_1} F_1 + \\
 & + \frac{L - (OB \sin \delta - OD \cos \delta) \sin \psi - DK \cos \psi}{l_2} F_2 + \\
 & + \frac{L + (OC \sin \delta + OD \cos \delta) \sin \psi - DK \cos \psi}{l_3} F_3 - m_5 g \cos \psi + Q_L,
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 & [I_5 + m_5 (L - L_0 + z_{c05})^2] \ddot{\psi} + 2m_5 (L - L_0 + z_{c05}) \dot{\psi} \dot{L} - \\
 & - [I_5 + m_5 (L - L_0 + z_{c05})^2] \dot{\delta}^2 \sin \psi \cos \psi + \mu_3 \dot{\psi} = m_5 g [L(t) - KM_0 + z_{c05}] \sin \psi + Q_\psi + \\
 & + \frac{-OA \cdot L \sin \varphi \cos \psi \cos \delta + OAr \sin \varphi \sin \psi \cos \delta + OD \cdot L \cos \psi \cos \delta}{l_1} F_1 + \\
 & + \frac{-ODr \sin \psi \cos \delta + OAr \cos \varphi \cos \psi + DK \cdot L \sin \psi + DKr \cos \psi + OA \cdot L \sin \psi \cos \varphi}{l_1} F_1 + \\
 & + \frac{-(OB \sin \delta - OD \cos \delta) \cdot (r \sin \alpha \sin \psi + L \cos \psi) + DK (L \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi)}{l_2} F_2 + \\
 & + \frac{(OC \sin \delta + OD \cos \delta) \cdot (L \cos \psi + r \sin \alpha \sin \psi) + DK (L \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi)}{l_3} F_3,
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 & (\dot{\delta} \sin^2 \psi + 2\dot{\delta} \dot{\psi} \sin \psi \cos \psi) [I_5 + m_5 (L - L_0 + z_{c05})^2] + 2m_5 \dot{\delta} \dot{L} \sin^2 \psi (L - L_0 + z_{c05}) + \mu_4 \dot{\delta} = Q_\delta + \\
 & + \frac{OA \cdot L \sin \varphi \sin \psi \sin \delta + OAr \sin \varphi \cos \psi \sin \delta - OD \cdot L \sin \psi \sin \delta}{l_1} F_1 - \frac{ODr \cos \psi \sin \delta}{l_1} F_1 + \\
 & + \frac{(OB \cos \delta + OD \sin \delta) \cdot (r \sin \alpha \cos \psi - L \sin \psi) + r \cos \alpha (OB \sin \delta - OD \cos \delta)}{l_2} F_2 + \\
 & + \frac{(OC \cos \delta - OD \sin \delta) \cdot (L \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi) + r \cos \alpha (OD \cdot \cos \delta + OC \sin \delta)}{l_3} F_3,
 \end{aligned} \tag{13}$$

где  $OD, OC, OB, OA$  – геометрические параметры поворотного основания;  $m_5, m_{BC}, m_{A2}, I_5$  – массово-геометрические параметры манипулятора;  $Q_\varphi = 0, Q_L = F \sin \psi \cos \delta, Q_\psi = FL(t) \cos \psi \cos \delta, Q_\delta = -FL(t) \sin \psi \sin \delta$  – силы реакции  $F$  обрабатываемой поверхности.

#### Пример расчета законов изменения управляющих сил

Процесс вычисления законов изменения управляющих сил  $F_s(t), s = 1, 2, 3, 4$  сводится к выполнению следующих этапов. В первую очередь задается конечное время перемещения  $\tau$  и выбирается фиксированный интервал времени  $\Delta t$ , через который необходимо найти декартовы координаты  $x_M(t_i), y_M(t_i), z_M(t_i)$  точки приложения реакции обрабатываемой поверхности по формулам (1–3). Далее с помощью выражения (4) находим значения обобщенных координат  $\psi(t_i), \delta(t_i), L(t_i)$  и значения их первых

и вторых производных. Путем решения оптимизационной задачи позиционирования [8] получаем значения угла поворота  $\varphi(t_i)$  поворотного основания и значения первых и вторых производных. Для каждого момента времени вычисляем значения длин исполнительных приводов  $l_s(t)$  по формулам (6–9). Задаваясь законом изменения силы реакции  $F$  обрабатываемой поверхности  $F(t)$ , для каждого момента времени  $t_i$  из (10–13) получаем систему алгебраических уравнений относительно искомых значений программных управляющих сил  $F_s(t), s = 1, 2, 3, 4$ .

Данный алгоритм реализован на примере перемещения инструмента манипулятора по пространственной прямой (рис. 2) из начальной точки  $M_0(0; 720; 80)$  в конечную  $M_k(-100; 850; 450)$  с постоянной скоростью 30 мм/с. Величина обрабатываемой силы постоянная и равная  $F = 150$  Н.

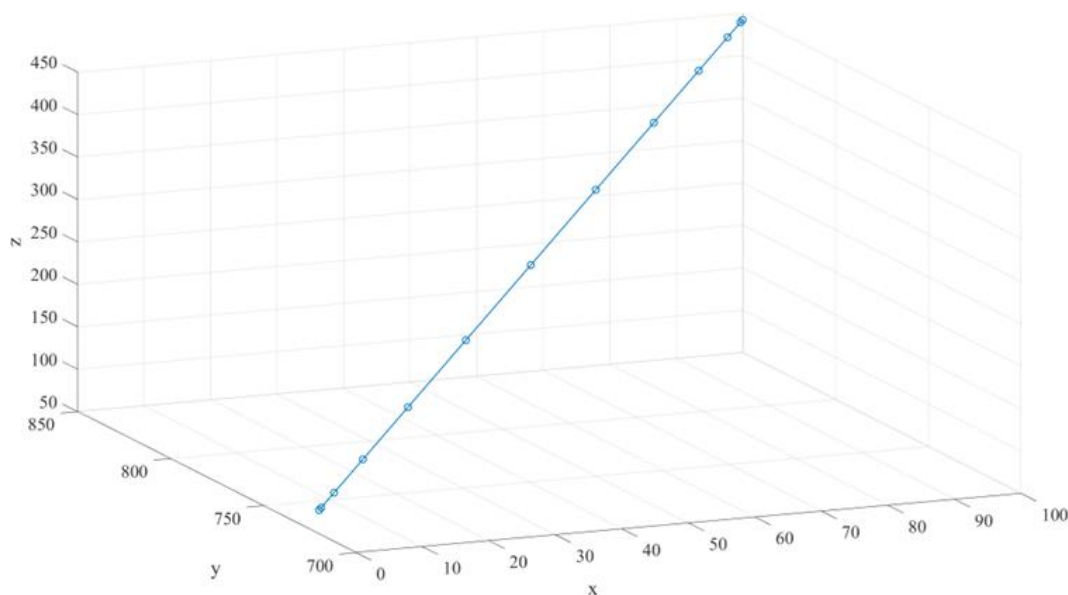


Рис. 2. Траектория движения инструмента

Полученные законы для управляющих усилий с учетом сил реакции  $F$  обрабатываемой

поверхности в точке контакта графически представлены на рис. 3.

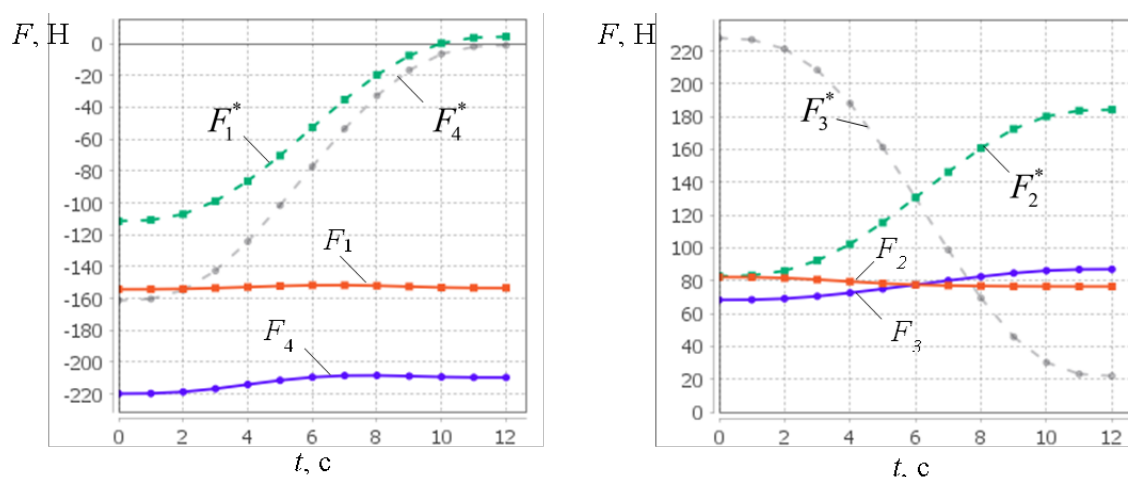


Рис. 3. Зависимости управляющих усилий:

*а* – первого  $F_1, F_1^*$  и четвертого  $F_4, F_4^*$  управляющих усилий без внешней нагрузки и при обработке поверхности;

*б* – второго  $F_2, F_2^*$  и третьего  $F_3, F_3^*$  управляющих усилий без внешней нагрузки и при обработке поверхности

### Выводы

Полученные законы для управляющих усилий показывают, что они зависят от кинематических параметров перемещения инструмента и усилий взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Сформулированный алгоритм синтеза программных управляющих усилий может быть реализован для конкретных технологических операций с учетом требований к обработке и сложности геометрии детали.

При этом отдельную задачу представляет собой определение траектории движения инструмента манипулятора, начиная от точки его касания с обрабатываемой поверхностью.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колковский, М. З. Основы динамики промышленных роботов / М. З. Колковский, А. В. Слоущ. – М.: Наука, 1988. – 239 с.
2. Воробьева, Н. С. Отслеживание приводами манипулятора параллельно-последовательной структуры программных перемещений рабочего органа / Н. С. Воробьева,

В. В. Жога, И. А. Несмиянов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 2. – С. 154–165.

3. Рыбак, Л. А. Синтез алгоритма коррекции траектории движения выходного звена робота-гексапода на основе теории искусственных нейронных сетей / Л. А. Рыбак, Ю. А. Мамаев, Л. Г. Вирабян // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 12. – С. 142–151.

4. Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев. П. м. 218886 РФ, МПК В66С 23/00 ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.

5. Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев. П. м. 218887 РФ, МПК В66С 23/00 ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.

6. Жога, В. В. Определение кинематических параметров исполнительных приводов для реализации программных траекторий / В. В. Жога, А. В. Нелюбова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 26–30.

7. Нелюбова, А. В. Динамика управляемого движения манипулятора-трипода с дополнительной связью / А. В. Нелюбова, И. П. Вершинина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(299) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2025. – С. 61–66.

8. 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.

## REFERENCES

1. Kolovskiy, M. Z. Fundamentals of dynamics of Industrial robots / M. Z. Kolovskiy, A. V. Sloushch. – M. : Nauka Publ., 1988. – 240 p.

2. Vorobyeva, N. S. Program displacement tracing of executive devices by the manipulator drives of parallel-sequential structures / N. S. Vorobyeva, V. V. Zhoga, I. A. Nesmiyanov // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. – 2019. – No. 2. – Pp. 154–165.

3. Rybak, L. A. Correction algorithms synthesis for the motion path of the hexapod robot output link based on the theory of artificial neural networks / L. A. Rybak, Yu. A. Mamaev, L. G. Virabyan // Vestnik BGU V. G. Shukhova. – 2016. – No. 12. – Pp. 142–151.

4. Patent RU 218886. Tripod manipulator / V. V. Zhoga, A. V. Nelyubova, N. G. Sharonov [et al.]; VSTU. – 2023.

5. Patent RU 218887 / V. V. Zhoga, A. V. Nelyubova, N. G. Sharonov [et al.]; VSTU – 2023.

6. Zhoga, V. V. Determination of kinematic parameters of actuators for the implementation of program trajectories / V. V. Zhoga, A. V. Nelyubova // Izvestiya VSTU. – 2023. – No. 9. – Pp. 26–30.

7. Nelyubova, A. V. Dynamics controlled movement of the manipulator-tripod with additional link / A. V. Nelyubova, I. P. Vershinina // Izvestiya VSTU. – 2025. – No. 4(299). – Pp. 61–66.

8. Nelyubova, A. V. Computation of kinematic characteristics of a manipulator-tripod with additional kinematic coupling / A. V. Nelyubova, V. V. Zhoga, I. P. Vershinina // Izvestiya VSTU. – 2023. – No. 4(275). – Pp. 71–76.

Статья поступила в редакцию 24.02.2026, доработана 02.03.2026, подписана в печать 16.03.2026  
The article was submitted 24.02.2026, revised 02.03.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 681.5  
DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-31-36

Научная статья  
Original article

*М. Е. Николаев, В. А. Перфилов, Н. В. Захаров, Н. С. Давтян*

**СИНТЕЗ КИНЕМАТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА  
УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ АГРЕГАТА  
ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА**

**Волгоградский государственный технический университет,  
Волгоград, Россия**

✉ Николаев Максим Евгеньевич, mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

**Аннотация.** Предложена конструкция автоматизированного погрузочно-транспортного агрегата. Описан технологический процесс загрузки, транспортировки и забивки свай. Проведен кинематический расчет манипуляционного устройства. Решена задача позиционирования сваи при перемещении ее из транспортного положения в место установки. Представлена зависимость углов поворота звеньев манипулятора от времени.

**Ключевые слова:** автоматизированный, захват, шасси, манипулятор, позиционирование, привод, звенья

**Для цитирования:** Николаев М. Е., Перфилов В. А., Захаров Н. В., Давтян Н. С. Синтез кинематического алгоритма управления манипулятором агрегата для возведения свайного фундамента. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 31–36. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-31-36.

**Информация об авторах:**

**Максим Евгеньевич Николаев** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Нефтегазовые сооружения», ВолгГТУ  
<https://orcid.org/0000-0003-2956-4064>

e-mail: mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

**Владимир Александрович Перфилов** – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Нефтегазовые сооружения», ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0001-9196-7572>

e-mail: vladimirperfilov@mail.ru

**Николай Вячеславович Захаров** – студент кафедры «Нефтегазовые сооружения», ВолгГТУ  
e-mail: n.zakharov1@mail.ru

**Никита Самвелович Давтян** – студент кафедры «Нефтегазовые сооружения», ВолгГТУ  
e-mail: nik.davt.2003@mail.ru

**Вклад авторов:**

**М. Е. Николаев** – определение цели работы, научное руководство, написание текста статьи.

**В. А. Перфилов** – обработка и анализ результатов исследования, расчет данных.

**Н. В. Захаров** – проектирование 3D-модели.

**Н. С. Давтян** – описание технологического процесса.

*M. E. Nikolaev, V. A. Perfilov, N. V. Zakharov, N. S. Davtyan*

**SYNTHESIS OF A KINEMATIC ALGORITHM FOR CONTROLLING THE MACHINE OF AN AGGREGATE FOR THE CONSTRUCTION OF A PILE FOUNDATION**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Maxim E. Nikolaev, mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

**Annotation.** The design of an automated loading and transport unit is proposed. The technological process of loading, transporting and driving piles is described. The kinematic calculation of the manipulation device is carried out. The problem of positioning the pile when moving it from the transport position to the installation location has been solved. The dependence of the rotation angles of the manipulator links on time is presented.

**Keywords:** automated, gripping, landing gear, manipulator, positioning, drive, links

**For citation:** Nikolaev M. E., Perfilov V. A., Zakharov N. V., Davtyan N. S. Synthesis of a Kinematic algorithm for controlling the machine of an Aggregate for the Construction of a Pile Foundation. Izvestia of VSTU. 2026; 4(311): 31–36. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-4-311-31-36.

**Information about the authors:**

**Maxim E. Nikolaev** – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Oil and Gas Facilities, VSTU

<https://orcid.org/0000-0003-2956-4064>

e-mail: mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

**Vladimir A. Perfilov** – D. Sc. (Engineering), Head of the Department of Oil and Gas Structures, VSTU

<https://orcid.org/0000-0001-9196-7572>

e-mail: vladimirperfilov@mail.ru

**Nikolay V. Zakharov** – student of the Department of Oil and Gas Engineering, VSTU

e-mail: n.zakharov1@mail.ru

**Nikita S. Davtyan** – student of the Department of Oil and Gas Structures, VSTU

e-mail: nik.davt.2003@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Maxim E. Nikolaev** – definition of the purpose of the work, scientific guidance, writing the text of the article.

**Vladimir A. Perfilov** – processing and analysis of research results, calculation of data.

**Nikolay V. Zakharov** – design of the 3D-model.

**Nikita S. Davtyan** – description of the technological process.

**Введение**

В настоящее время при возведении свайного фундамента широко применяются сваебойные коперы. Недостатком этого технологического процесса является малая автоматизация. Сваи необходимо доставить на строительную площадку, установить сваю в сваебойный молот и произвести забивку. При этом используется комплекс механизированных средств, а также операторы, осуществляющие контроль и мониторинг технологического процесса. С целью уменьшения ручного труда и количества задействованной техники предлагается использовать автоматизированный погрузочно-

транспортный агрегат, на котором установлен манипулятор с тремя степенями подвижности, снабженный универсальным грузозахватным устройством с молотом.

Авторами предложена конструкция автоматизированного погрузочно-транспортного агрегата. Описан технологический процесс загрузки, транспортировки и забивки свай. Проведен кинематический расчет манипуляционного устройства. Решена задача позиционирования сваи при перемещении ее из транспортного положения в место установки. Представлена зависимость углов поворота звеньев манипулятора от времени.

### Общий вид и расчетные схемы

При возведении сооружений, имеющих фундаментную основу, состоящую из свай, используются сваебойные коперы. Последовательность такого технологического процесса состоит из ряда операций:

- 1) подготовка площадки;
- 2) транспортировка свай к месту их погружения;
- 3) установка сваи в молот;
- 4) забивка по размеченным точкам.

Все работы требуют задействования ком-

плекса механизированных средств, состоящих из погрузчиков и транспортных машин.

Автоматизированный погрузчик (рис. 1) состоит из двухосного гусеничного шасси 1, кузова 2 для транспортировки груза, кабины 3 на поворотном основании 4, манипулятора последовательной структуры, состоящего из звеньев 5–7, шарниров 8–10, являющихся кинематическими парами пятого класса, исполнительных приводов 11–13, трехступенчатого грузозахватного устройства 14, состоящего из тяг 15, привода 16, сваебойного молота 17, блока управления 18, датчика контроля положения свай 19 [1–3].

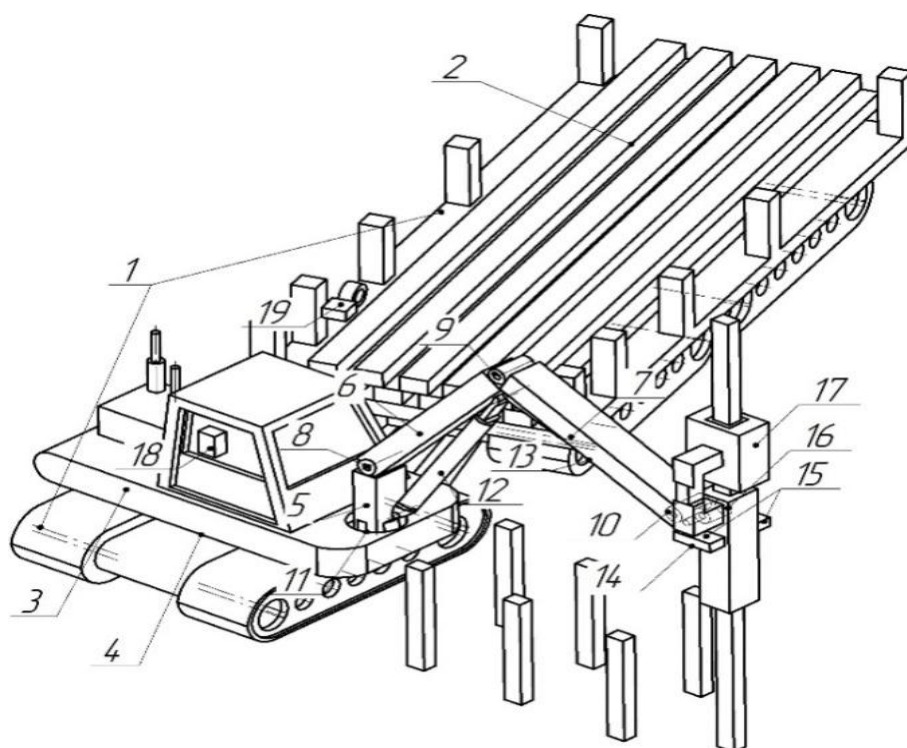


Рис. 1. Общий вид автоматизированного погрузчика

Работа автоматизированного погрузчика осуществляется следующим образом (рис. 2). В ручном режиме оператор поворачивает на необходимый угол основание 4. Затем в автоматическом режиме манипулятор по заданным координатам осуществляет укладку свай в кузов 2. Позиционирование грузозахватного органа к месту захвата до укладки свай осуществляется звеньями 5–7 и исполнительными приводами 11–13. Тягами 14 и приводом 16 свая фиксируется в момент ее перемещения. Вся ра-

бота осуществляется без сваебойного молота 17, который в последующем устанавливается на захват. По наполнению кузова датчиком 12 контроля положения свай подается сигнал на блок управления 18, что кузов заполнен. Далее с помощью оператора автоматизированный погрузочно-транспортный агрегат перемещается к месту возведения свайного фундамента. По прибытию молот устанавливается в грузозахватный орган. Далее в автоматическом режиме происходит установка сваи в молот.

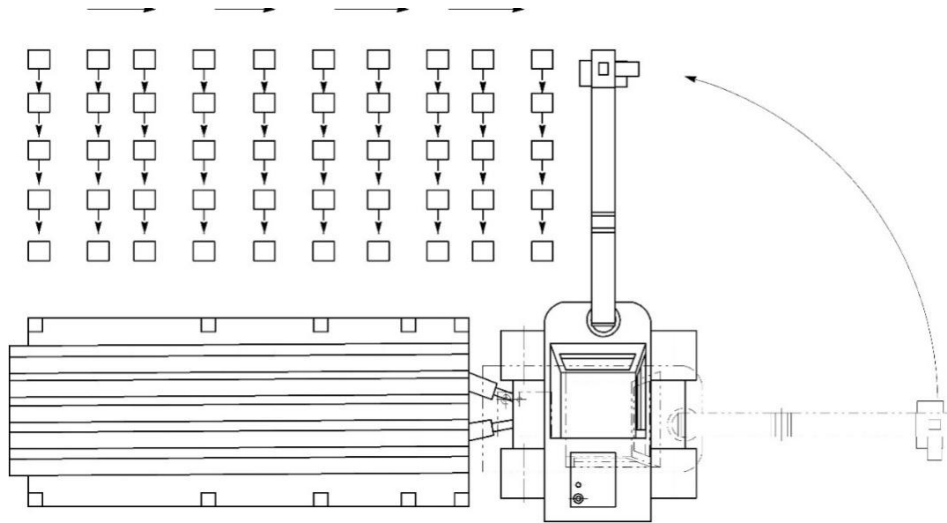


Рис. 2. Технологический процесс забивки свай

Грузозахватный орган подводит молот к кузову 2, свая оператором цепляется за специальное крепление и устанавливается в молот. После чего в автоматическом режиме манипулятор направляется к месту забивки и осуществляется погружение сваи по заданным координатам.

Весь цикл технологической операции забивки свай повторяется до момента сигнала с датчика контроля 19 положения свай, что в кузове не осталось свай.

### Кинематический расчет манипулятора

При забивке свай по заданным координатам требуется высокая точность перемещения захватного устройства, поэтому необходимо решить задачу позиционирования. Начальная конфигурация манипулятора определяется тремя обобщенными координатами  $\varphi_{10} = 0$  рад,  $\varphi_{20} = 1,571$  рад,  $\varphi_{30} = 4,172$  рад, что соответствует декартовым координатам. Длины звеньев  $l_{1,2,3} = 4$  м, массы –  $m_{1,2,3} = 200$  кг.

На рисунке 3 представлена кинематическая схема манипулятора с тремя вращательными парами.

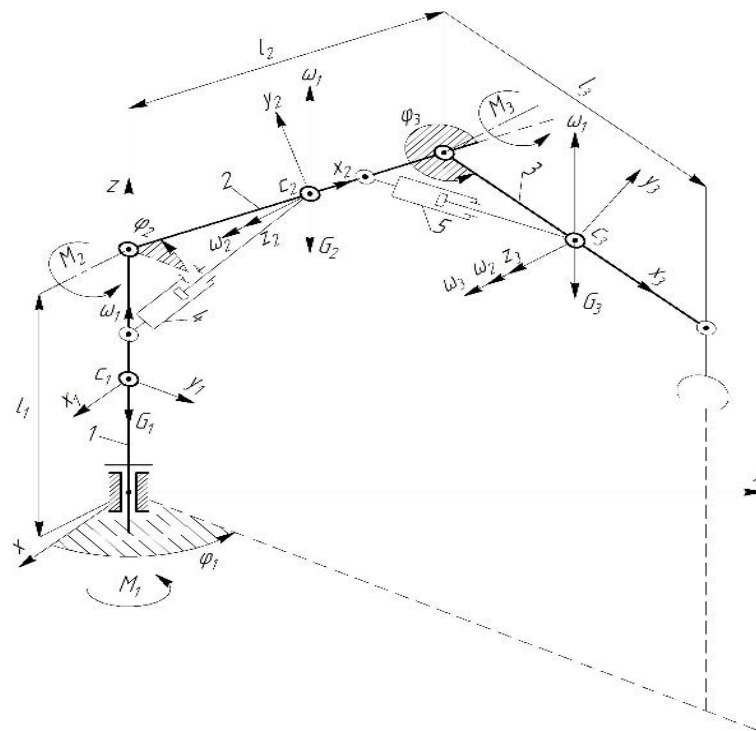


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора с тремя вращательными парами

Координаты характерной точки захвата находятся из решения прямой задачи о положениях:

$$\begin{aligned} (l_2 \cdot \cos(\varphi_{2k}) + l_3 \cdot \cos(\varphi_{2k} + \varphi_{3k})) \cdot \cos(\varphi_{1k}) - x_M(t) &= 0, \\ (l_2 \cdot \cos(\varphi_{2k}) + l_3 \cdot \cos(\varphi_{2k} + \varphi_{3k})) \cdot \sin(\varphi_{1k}) - y_M(t) &= 0, \\ l_1 + l_2 \cdot \sin(\varphi_{2k}) + l_3 \cdot \sin(\varphi_{2k} + \varphi_{3k}) - z_M(t) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_M(t), y_M(t), z_M(t)$  – законы изменения декартовых координат точки захвата при движении по прямой [4–7].

Одной из основных траекторий перемещения захвата при выполнении технологической операций является прямолинейное поступательное перемещение. Зададим закон перемещения точки  $M$  грузозахватного устройства

по прямой линии из начальной точки с координатами  $x_M(0) = 1200$  мм,  $y_M(0) = 1200$  мм,  $z_M(0) = 1200$  мм в конечную точку с координатами  $x_M(T) = 3200$  мм,  $y_M(T) = 3200$  мм,  $z_M(T) = 3200$  мм за время  $T = 20$  с. Закон изменения дуговой координаты выбирается так, чтобы в начальной и конечной точках траектории скорости и ускорения были равны нулю [8]:

$$S(t) = \left( 10 - 15 \frac{t}{T} + 6 \frac{t^2}{T^2} \right) \frac{t^3}{T^3} L_e, \quad T \geq t \geq 0, \quad (2)$$

где  $L_e = \sqrt{(x_M(T) - x_M(0))^2 + (y_M(T) - y_M(0))^2 + (z_M(T) - z_M(0))^2}$  – длина траектории.

Уравнение пространственной прямой, проходящей через две точки с начальными координатами  $x_M(0) = x_{M0}, y_M(0) = y_{M0}, z_M(0) = z_{M0}$  и конечными  $x_M(T) = x_{Mk}, y_M(T) = y_{Mk}, z_M(T) = z_{Mk}$ :

$$\Delta x = x_M(T) - x_M(0), \quad \Delta y = y_M(T) - y_M(0), \quad \Delta z = z_M(T) - z_M(0). \quad (3)$$

Вводя обозначения

$$\begin{aligned} K_X &= \sqrt{1 + K_1^2 + K_2^2}, \quad K_Y = \sqrt{1 + 1/K_1^2 + K_3^2}, \quad K_Z = \sqrt{1 + 1/K_2^2 + 1/K_3^2}, \\ K_1 &= \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad K_2 = \frac{\Delta z}{\Delta x}, \quad K_3 = \frac{\Delta z}{\Delta y}, \end{aligned} \quad (4)$$

законы изменения декартовых координат получаем в виде:

$$x_M(t_i) = \frac{S(t_i)}{K_X} + x_M(0), \quad y_M(t_i) = y_M(0), \quad z_M(t_i) = \frac{S(t_i)}{K_Z} + z_M(0). \quad (5)$$

Поделив траекторию движения захвата на четыре временных участка  $t = 1$  с,  $t = T/3$  с,  $t = 2T/3$  с,  $t = T$ , решаем систему нелинейных алгебраиче-

ских уравнений (1). В результате, получаем зависимости углов поворота  $\varphi_{ik}$  исполнительных звеньев манипулятора от времени  $t$  (рис. 4)

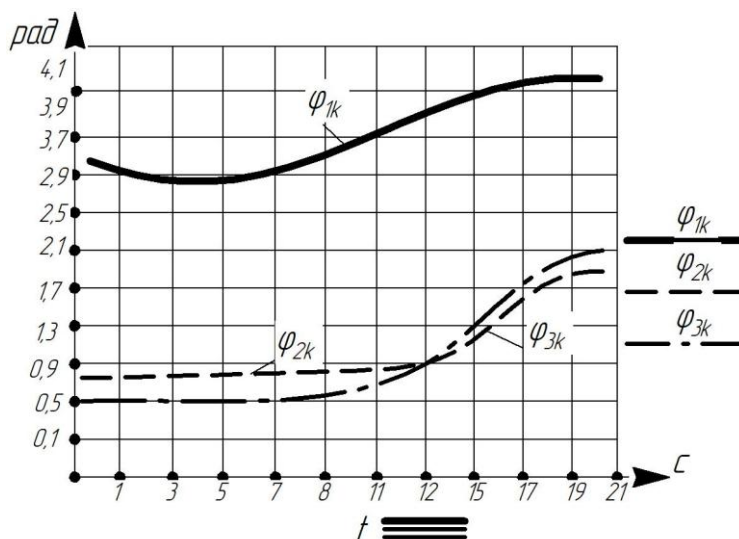


Рис. 4. Зависимости углов поворота  $\varphi_{ik}$  исполнительных звеньев манипулятора от времени  $t$

### Выводы

1. В результате исследований представлена 3D-модель конструкции автоматизированного агрегата.
2. Рассмотрен технологический процесс забивки свай.
3. Решена задача позиционирования выходного звена манипуляционного механизма.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов, М. И. Теория механизмов и машин: учеб пособие / М. И. Белов, С. В. Сорокин. – М. : 2020. – 322 с.
2. Братчиков, С. А. Решение обратной задачи кинематики манипулятора / С. А. Братчиков, Е. А. Абрамова, Ю. В. Федосов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 56. – С. 4–11.
3. Ту, Р. Разработка программного модуля для моделирования кинематики и динамики манипулятора // Прикладная математика и физика. – 2023. – № 1. – С. 70–83.
4. Makeeva, E. I. Повышение эффективности эксплуатации погрузочной машины 2ПНБ-2 путем внедрения автоматизированного управления процессов подачи / Е. И. Макеева, М. Д. Мирославская // «Наука и творчество: вклад молодежи»: сб. материалов всероссийской молодежной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Махачкала, 2020. – С. 238–241.
5. Nikolaev, M. E. Definition of service area of agricultural loading robot with manipulator of parallel-serial structure / M. E. Nikolaev, I. A. Nesmianov, E. N. Zaharov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – No. 1. – P. 747. – DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012125.
6. Zhoga, V. V. The architecture of the control system for the mobile process robot with walking movers / V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, S. E. Terekhov, V. A. Belikov // International Review of Mechanical Engineering. – 2017. – No. 5. – Pp. 337–342. – DOI: 10.15866/ireme.v1i5.11597.
7. Nikolaev, M. Justification Parameters and Planning Capture Trajectories for Robotic Loading and Transport / M. Nikolaev, I. Nesmianov, V. Zhoga, A. Ivanov, // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – No. 245. – DOI: 10.1007/978-981-16-3349-2\_20.

8. Воробьева, Н. С. Отслеживание приводами манипулятора параллельно-последовательной структуры программных перемещений рабочего органа / Н. С. Воробьева, В. В. Жога, И. А. Несмиянов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – № 2. – С. 154–165.

### REFERENCE

1. Belov, M. I. Theory of mechanisms and machines: textbook / M. I. Belov, S. V. Sorokin. – M. : 2020. – 322 p.
2. Bratchikov, S. A. Solution of the inverse problem of manipulator kinematics / S. A. Bratchikov, E. A. Abramova, Yu. V. Fedosov // Bulletin of Tomsk State University. Management, computer engineering and computer science. – 2021. – No. 56. – Pp. 4–11.
3. Tu, R. Development of a software module for modeling kinematics and dynamics of a manipulator // Applied Mathematics Physics. – 2023. – No. 1. – Pp. 70–83.
4. Makeeva, E. I. Improving the efficiency of the 2pnb-2 loading machine by implementing automated control of feeding processes / E. I. Makeeva, M. D. Miroslavskaya // “Science and creativity: the contribution of youth”: materials of the All-Russian youth scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. Makhachkala, 2020. – Pp. 238–241.
5. Nikolaev, M. E. Definition of service area of agricultural loading robot with manipulator of parallel-serial structure / M. E. Nikolaev, I. A. Nesmianov, E. N. Zaharov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – No. 1. – P. 747. – DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012125.
6. Zhoga, V. V. The architecture of the control system for the mobile process robot with walking movers / V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, S. E. Terekhov, V. A. Belikov // International Review of Mechanical Engineering. – 2017. – No. 5. – Pp. 337–342. – DOI: 10.15866/ireme.v1i5.11597.
7. Nikolaev, M. Justification Parameters and Planning Capture Trajectories for Robotic Loading and Transport / M. Nikolaev, I. Nesmianov, V. Zhoga, A. Ivanov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – No. 245. – DOI: 10.1007/978-981-16-3349-2\_20.
8. Vorobyova, N. S. Tracking the parallel-sequential structure of program movements of the working organ by manipulator drives / N. S. Vorobyova, V. V. Zhoga, I. A. Nesmianov // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems. – 2019. – No. 2. – Pp. 154–165.

Статья поступила в редакцию 26.02.2026, доработана 05.03.2026, подписана в печать 16.03.2026  
The article was submitted 26.02.2026, revised 05.03.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 004.896  
DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-37-41

Научная статья  
Original article

*А. А. Приходский, У. В. Белкин*

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ КООРДИНАЦИИ  
В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ  
С ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИЕЙ СВЯЗИ**

**Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия**

✉ Андрей Александрович Приходский, prihodskiy@gmail.com

**Аннотация.** Работа посвящена экспериментальному сравнению трех стратегий координации – флокинга, окружения целевых объектов и управления через выделенных лидеров (pinningcontrol) – в условиях динамически изменяющейся топологии взаимодействия. Разработана модульная программная среда на базе моделей двойного интегратора и квадрокоптеров. Динамика агентов сформулирована через импульс движения, что обеспечивает корректный учет инерции при формировании управляющих сигналов. Оценка проводилась по четырем метрикам: среднеквадратичному отклонению от целевых позиций (СКО, м<sup>2</sup>), времени сходимости (с), удельным энергозатратам (м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>) и вероятности сохранения связности графа. Адаптивная настройка параметров методом проксимальной оптимизации политики (PPO) сокращает время сходимости на 20–30 % и снижает энергозатраты на 15–25 % по сравнению со статическими конфигурациями. Флокинг надежен при плотносвязных топологиях; pinningcontrol предпочтителен при разреженных графах.

**Ключевые слова:** многоагентные системы, децентрализованное управление, флокинг, роботизированные рои, динамическая топология, обучение с подкреплением, автономная координация

**Для цитирования:** Приходский А. А., Белкин У. В. Сравнительный анализ алгоритмов координации в децентрализованных многоагентных системах с динамической топологией связи. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 37–41. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-37-41.

**Информация об авторах:**

**Андрей Александрович Приходский** – аспирант, ассистент кафедры электромеханики и робототехники, СПбГУАП

e-mail: prihodskiy@gmail.com

**Ульян Вячеславович Белкин** – ассистент образовательного офиса Инженерной школы, аспирант кафедры электромеханики и робототехники, СПбГУАП

e-mail: i@ubelkin.ru

**Вклад авторов:**

**А. А. Приходский** – определение цели работы, разработка методики эксперимента, написание текста статьи, участие в обсуждении результатов.

**У. В. Белкин** – проведение экспериментов, оценка результатов, участие в обсуждении результатов.

*A. A. Prihodskiy, U. V. Belkin*

**COMPARATIVE ANALYSIS OF COORDINATION ALGORITHMS  
IN DECENTRALIZED MULTI-AGENT SYSTEMS  
WITH DYNAMIC COMMUNICATION TOPOLOGY**

**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
Saint-Petersburg, Russia**

✉ Andrey A. Prihodskiy, prihodskiy@gmail.com

**Abstract.** This paper is devoted to the experimental comparison of three coordination strategies – flocking, target encirclement, and control via selected leaders (pinning control) – under conditions of dynamically changing interaction topology. A modular software environment has been developed based on double integrator models and quadcopters; agent dynamics are formulated in terms of momentum, which ensures correct accounting for inertia during control signal generation. Evaluation was conducted using four metrics: mean square deviation from target positions (MSE, m<sup>2</sup>), convergence time (s), specific energy consumption (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>), and graph connectivity preservation probability. Adaptive parameter tuning using the Proximal Policy Optimization (PPO) method reduces convergence time by 20–30 % and lowers energy consumption by 15–25 % compared to static configurations. Flocking is reliable in densely connected topologies; pinning control is preferred for sparse graphs.

**Keywords:** multi-agent systems, decentralized control, flocking, robotic swarms, dynamic topology, reinforcement learning, autonomous coordination

**For citation:** Prihodskiy A. A., Belkin U. V. Comparative analysis of coordination algorithms in decentralized multi-agent systems with dynamic communication topology. *Izvestiya VSTU*. 2026; 4(311): 37–41. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-4-311-37-41.

**Information about the authors:**

**Andrey A. Prihodskiy** – Postgraduate Student, Assistant Professor of the Department of Electromechanics and Robotics, SUAI, Saint-Petersburg

e-mail: prihodskiy@gmail.com

**Ulyan V. Belkin** – Assistant at the Educational office of the Engineering School, Postgraduate Student of the Department of Electromechanics and Robotics, SUAI, Saint-Petersburg

e-mail: i@ubelkin.ru

**Contribution of the authors:**

**Andrey A. Prihodskiy** – defining the purpose of the work, developing experimental methods, writing the text of the article, participating in the discussion of the results.

**Ulyan V. Belkin** – conducting experiments, evaluating the results, participating in the discussion of the results.

**Введение**

Многоагентные системы – группы автономных вычислительных единиц, каждая из которых действует на основе локальной информации о соседях. Такой подход востребован в задачах патрулирования территорий роями беспилотников [1, 2], навигации колонн автономных транспортных средств [3] и распределенного мониторинга. Принципиальное отличие от централизованного управления состоит в том, что при числе агентов порядка 50 и выше единый координирующий узел становится узким местом: вычислительная нагрузка на него растет квадратично с числом связей, задержки накапливаются, а его отказ выводит из строя всю группу. Перенос принятия решений на борт каждого агента устраняет единую точку отказа, но порождает другую задачу – обеспечение глобально согласованного поведения без центрального координатора.

Среди устоявшихся подходов к ее решению выделяют три: классические правила флоклинга Рейнольдса [4], основанные на локальных потенциальных функциях притяжения и отталкивания; формулировку Ольфати-Сабера [5], расширяющую эту идею на системы с доказуемой устойчивостью; метод pinningcontrol [6], где небольшая доля агентов-лидеров притягивается к заданным позициям и тем самым «тянет» за собой всю группу через локальные связи.

Обучение с подкреплением открывает путь к адаптивной настройке параметров таких контроллеров [7, 8], однако систематического сравнения перечисленных стратегий в единой экспериментальной среде с варьируемой топологией и вредоносными агентами до сих пор не проводилось. Большинство работ рассматривают статические топологии [9, 10], а устойчивость к возмущениям изучена преимущественно для ма-

лых групп [11]. Цель настоящей работы – восполнить этот пробел.

**Методика**

Экспериментальная среда реализована на языке Python в виде модульного симулятора multi-agent\_sim v1.0, включающего модуль динамики агентов, модуль планирования траекторий с реализациями трех алгоритмов и центральный оркестратор.

Состояние каждого агента описывается вектором  $x_i = (p_i, \dots, \dot{p}_i)$ , где  $p_i \in R^d$  представляет позицию в  $d$ -мерном пространстве ( $d = 2$  или  $d = 3$ ), а  $\dot{p}_i \in R^d$  – вектор скорости. Управляющий сигнал  $u_i$  интерпретируется как ускорение при постоянной массе  $m = \text{const}$ , что эквивалентно описанию динамики через импульс движения и обеспечивает физически корректный учет инерции – без этого любая смена направления порождала бы мгновенный скачок скорости. Динамика системы задается дискретными уравнениями двойного интегратора с шагом дискретизации  $h$ :

$$p_i(t+h) = p_i(t) + h\dot{p}_i(t), \quad (1)$$

$$\dot{p}_i(t+h) = \dot{p}_i(t) + hu_i(t). \quad (2)$$

Для квадрокоптеров применяется линеаризованная модель горизонтального полета. Линеаризация вносит погрешность при больших углах наклона, поэтому приведенные оценки энергозатрат следует считать нижней границей реальных значений.

Алгоритм флоклинга вычисляет управляющее воздействие как сумму градиента потенциальной функции и члена согласования скоростей:

$$u_i = -\sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla_{p_i} U_j(|p_i - p_j|) - k_v(v_i - \bar{v}), \quad (3)$$

где  $k_v > 0$  – коэффициент согласования скоростей,  $\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \dot{p}_k$  – средняя скорость группы,  $\mathcal{N}_i$  – множество соседей агента  $i$  в пределах радиуса связи. Потенциальная функция парного взаимодействия обеспечивает отталкивание при сближении (первый член) и притяжение на больших расстояниях (второй):

$$U_j = \frac{a}{|p_i - p_j|^2} + b|p_i - p_j|^2, \quad a, b > 0, \quad (4)$$

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $k_v$  и прочие весовые параметры определялись двумя способами: точным сканированием в диапазонах  $k_a \in [0, 2; 2, 0]$ ,  $k_r \in [0, 2; 1, 2]$  с усреднением по 20 прогонам, либо автоматически через РРО.

Алгоритм окружения распределяет агентов по окружности вокруг движущейся цели с центром  $c$  и радиусом  $R$ . Управляющий закон разделяется на радиальную и угловую составляющие:

$$u_{r,i} = k_r \left( R \frac{p_i - c}{\|p_i - c\|} - (p_i - c) \right), \quad (5)$$

$$u_{\theta,i} = -k_\theta (\theta_i - \theta_{0,i} - \omega t) e_\perp. \quad (6)$$

где  $\theta_i$  – текущее угловое положение агента,  $\theta_{0,i}$  – начальный угол,  $\omega$  – желаемая угловая скорость,  $e_\perp$  – единичный вектор, перпендикулярный направлению на центр.

В методе управления через лидеров подмножество  $\mathcal{L} \subset [1, \dots, N]$  связывается с целевыми позициями  $g$  регулятором  $u_i = -k_p (p_i - g)$  для  $i \in \mathcal{L}$ . Остальные агенты выполняют алгоритм консенсуса. Лидеры отбирались по степенной центральности узлов графа, обновляемого каждые 10 шагов.

Для адаптивной настройки параметров использовался алгоритм РРО из библиотеки Stable Baselines3 [12]. Функция вознаграждения:

$$r(t) = -\alpha \cdot MSE(t) - \beta \cdot |u(t)|^2, \quad \alpha = 1, 0; \beta = 0, 1, \quad (7)$$

где  $|u(t)|^2$  – штраф за энергозатраты. Обучение проводилось на протяжении 1000 эпизодов с размером батча 256.

Взаимодействие между агентами описывается графом  $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ , где  $\mathcal{V}$  – множество агентов,  $\mathcal{E}$  – множество ребер, соответствующих

каналам связи. Ребро  $(i, j)$  существует, если  $|p_i - p_j| < r_j$ . Рассматривались три топологии: полностью связная,  $k$ -ближайших соседей ( $k = 3$ ) и пороговая ( $r_{\max} = 10$  л. ед.).

Оценка качества производилась по четырем метрикам:  $MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|p_i - p_i^*\|^2$  (м<sup>2</sup>); времени сходимости  $T_c$  – момент, когда  $MSE$  опускается ниже  $\varepsilon = 0,01$  м<sup>2</sup> и удерживается там 50 шагов; удельным энергозатратам  $E = \int_0^T \sum_i 1^N |u_i(t)|^2 dt$  (м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>); вероятности сохранения связности графа  $P_{conn}$ , оцениваемая как доля прогонов, в которых граф агентов оставался связным на протяжении всей симуляции. Эксперименты проводились для  $N = 10, 30$  и 100 агентов, по 50 прогонов в каждой конфигурации; шаг дискретизации  $h = 0,05$  с, горизонт симуляции  $T = 100$  с.

#### Обсуждение результатов

Алгоритм окружения показал наименьшее время сходимости во всех конфигурациях: при  $N = 30$  в полностью связной топологии  $T_c = 15,2 \pm 2,1$  с против  $18,7 \pm 2,4$  с у базового флокинга. Объяснение очевидно – агент движется к явно заданной точке и не тратит время на «переговоры» с соседями о форме формирования. Обратная сторона – метод требует централизованного планирования целевых позиций и не применим там, где геометрия формирования меняется динамически.

Разреженность графа бьет по флокингу сильнее, чем по остальным алгоритмам. Переход от полностью связной топологии к  $k$ -ближайших соседей увеличивает  $T_c$  на 28 % при  $N = 10$  и уже на 37 % при  $N = 100$  – система все хуже справляется с распространением информации через редкие ребра. При 20 % вредоносных агентах вероятность сохранения связности для разреженного флокинга падает до  $P_{conn} = 0,64$ , т. е. примерно в каждом третьем прогоне группа разбивается на изолированные кластеры. Именно здесь проявляется сильная сторона управления через лидеров: агенты-лидеры, фиксированные на целевых позициях, действуют как якоря связности и не позволяют группе фрагментироваться [13]. При тех же условиях алгоритм окружения удерживает  $P_{conn} = 0,90$ .

Применение РРО дает статистически значимое ( $p < 0,01$  по критерию Стьюдента) улучшение по всем метрикам. Сокращение  $T_c$  на 20–30 % и снижение  $E$  на 15–25 % достигается за счет более плавных управляющих сигналов: обученный контроллер избегает резких изменений скорости, которые дорого обходятся с точки зрения энергии. Показательно, что обучение проводилось без вредоносных агентов, однако найденные параметры ( $k_a = 1,12$ ;  $k_r = 0,63$ ) попали в центр оптимальной области  $k_a \in [0,8; 1,5]$ ,  $k_r \in [0,4; 0,8]$ , устойчивой к умеренным возмущениям. Этот результат согласуется с данными Kargar и Kyrki [14], которые получили прирост энергоэффективности 18–22 % при рекуррентной проксимальной оптимизации на схожих задачах.

Управление через лидеров характеризуется повышенными энергозатратами в первые 20 с: лидеры выводятся на целевые позиции интенсивными воздействиями. После 40 с картина меняется – остальные агенты пассивно следуют за лидерами через локальные связи, и суммарное энергопотребление опускается ниже уровня базового флокнинга. Это делает метод особенно привлекательным для сценариев с длительными миссиями при ограниченной связи – например, для подводных или космических аппаратов.

Из ограничений работы следует отметить два. Линеаризованная модель квадрокоптера не воспроизводит нелинейные аэродинамические эффекты, поэтому полученные оценки энергозатрат – нижняя граница реальных. При  $N = 100$  симулятор требовал уменьшения шага дискретизации, что указывает на необходимость оптимизации вычислительного ядра перед масштабированием на большие группы [15–18].

### Выводы

Разработана модульная среда для воспроизводимого сравнения алгоритмов координации в децентрализованных многоагентных системах. Динамика агентов сформулирована через импульс движения; введены четыре количественные метрики с явными размерностями.

Алгоритм окружения обеспечивает наименьшее время сходимости (на 14–18 % быстрее флокнинга) и наибольшую устойчивость к вредоносным агентам ( $P_{\text{com}} = 0,90$  при 20 % возмущенных узлов).

Метод управления через лидеров предпочтителен при разреженных топологиях: он удерживает связность там, где флокнинг фрагментируется.

Адаптивная настройка параметров через РРО дает значимое улучшение по всем метрикам при сохранении обобщающей способности на возмущенные сценарии.

Практические рекомендации: окружение – для мониторинга с фиксированной геометрией; флокнинг с РРО – для энергоэффективной координации; управление через лидеров – при ограниченной связи.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tang, R. Enhanced multi agent coordination algorithm for drone swarm patrolling in durian orchards / R. Tang [et al.] // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. Iss. 1. – P. 9139. – DOI: 10.1038/s41598-025-88145-7.
2. Dykhovychnyi, O. Energy-efficient flocking with nonlinear navigational feedback / O. Dykhovychnyi, A. Panchenko // Nonlinear Dynamics. – 2025. – Vol. 113. Iss. 6. – Pp. 5725–5753. – DOI: 10.1007/s11071-024-10527-9.
3. Guo, Y. MAPPO-PIS: A Multi-agent Proximal Policy Optimization Method with Prior Intent Sharing for CAVs' Cooperative Decision-Making / Y. Guo [et al.] // ECCV 2024 Workshops. LNCS. – 2025. – Vol. 15630. – Pp. 246–262.
4. Reynolds, C. W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model / C. W. Reynolds // Computer Graphics (SIGGRAPH '87). – 1987. – Vol. 21. Iss. 4. – Pp. 25–34. – DOI: 10.1145/37402.37406.
5. Olfati-Saber, R. Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithms and Theory / R. Olfati-Saber // IEEE Trans. Autom. Control. – 2006. – Vol. 51. Iss. 3. – Pp. 401–420. – DOI: 10.1109/TAC.2005.864190.
6. Chen, G. Network synchronizability analysis: A graph-theoretic approach / G. Chen, Z. Duan // Chaos. – 2008. – Vol. 18. Iss. 3. – P. 037102. – DOI: 10.1063/1.2965530.
7. Li, Y. Multiagent Reinforcement Learning Based on Structural Coordination / Y. Li [et al.] // Tsinghua Science and Technology. – 2025. – Vol. 30. Iss. 3. – Pp. 278–291.
8. Baltes, J. Cooperative dual-actor proximal policy optimization for multi-robot control / J. Baltes, I. Akbar, S. Saeedvand // Advanced Engineering Informatics. – 2025. – Vol. 63. – P. 102960.
9. Gerdpratoom, N. Decentralized NMPC-based flock navigation with obstacle avoidance / N. Gerdpratoom, K. Yamamoto // Frontiers in Robotics and AI. – 2025. – Vol. 12. – P. 1540808.
10. Kong, F. Flocking with obstacle avoidance for fixed-wing UAVs via NMPC / F. Kong [et al.] // 42nd Chinese Control Conference. – 2023. – Pp. 5957–5962.
11. Cao, Y. Distributed Coordinated Tracking With Reduced Interaction / Y. Cao, W. Ren // IEEE Trans. Autom. Control. – 2012. – Vol. 57. Iss. 1. – Pp. 33–48.
12. Schulman, J. Proximal Policy Optimization Algorithms / J. Schulman [et al.] // Режим доступа: <http://arXiv:1707.06347>. 2017.
13. Liu, J. Topology uniformity pinning control for multi-agent flocking / J. Liu [et al.] // Complex & Intelligent Systems. – 2024. – Vol. 10. – Pp. 2013–2027. – DOI: 10.1007/s40747-023-01253-7.
14. Kargar, E. MACRPO: Multi-agent cooperative recurrent policy optimization / E. Kargar, V. Kyrki // Frontiers in Robotics and AI. – 2024. – Vol. 11. – P. 139.
15. Белкин, У. В. Разработка и оценка алгоритмов децентрализованного управления роями роботов в сценариях

ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций / У. В. Белкин, А. А. Приходский, С. А. Сериков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (299) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2025. – С. 12–15. – DOI 10.35211/1990-5297-2025-4-299-12-15.

16. Белкин, У. В. Совершенствование методов децентрализованного управления роем роботов для реагирования на чрезвычайные ситуации: алгоритм рассредоточения / У. В. Белкин, А. А. Приходский, С. А. Сериков // Качество и жизнь. – 2025. – № 2(46). – С. 63–70.

17. Белкин, У. В. Моделирование коллективного поведения роевых роботизированных систем в условиях экстремальных сред / У. В. Белкин, А. А. Приходский // Экстремальная робототехника. – 2025. – № 1(36). – С. 134–143.

18. Belkin, U. V. Hybrid Swarm Control Based on Combining Visual and Communication Navigation in Uncertain Environments / U. V. Belkin, A. A. Prihodskiy, S. A. Serikov // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. – 2025. – Pp. 1–5. – DOI: 10.1109/WECNF65186.2025.11017149.

#### REFERENCE

1. Tang, R. Enhanced multi agent coordination algorithm for drone swarm patrolling in durian orchards / R. Tang [et al.] // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. Iss. 1. – P. 9139. – DOI: 10.1038/s41598-025-88145-7.

2. Dykhovychnyi, O. Energy-efficient flocking with nonlinear navigational feedback / O. Dykhovychnyi, A. Panchenko // Nonlinear Dynamics. – 2025. – Vol. 113. Iss. 6. – Pp. 5725–5753. – DOI: 10.1007/s11071-024-10527-9.

3. Guo, Y. MAPPO-PIS: A Multi-agent Proximal Policy Optimization Method with Prior Intent Sharing for CAVs' Cooperative Decision-Making / Y. Guo [et al.] // ECCV 2024 Workshops. LNCS. – 2025. – Vol. 15630. – Pp. 246–262.

4. Reynolds, C. W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model / C. W. Reynolds // Computer Graphics (SIGGRAPH '87). – 1987. – Vol. 21. Iss. 4. – Pp. 25–34. – DOI: 10.1145/37402.37406.

5. Olfati-Saber, R. Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithms and Theory / R. Olfati-Saber // IEEE Trans. Autom. Control. – 2006. – Vol. 51. Iss. 3. – Pp. 401–420. – DOI: 10.1109/TAC.2005.864190.

6. Chen, G. Network synchronizability analysis: A graph-theoretic approach / G. Chen, Z. Duan // Chaos. – 2008. – Vol. 18. Iss. 3. – P. 037102. – DOI: 10.1063/1.2965530.

7. Li, Y. Multiagent Reinforcement Learning Based on Structural Coordination / Y. Li [et al.] // Tsinghua Science and Technology. – 2025. – Vol. 30. Iss. 3. – Pp. 278–291.

8. Baltes, J. Cooperative dual-actor proximal policy optimization for multi-robot control / J. Baltes, I. Akbar, S. Saeedvand // Advanced Engineering Informatics. – 2025. – Vol. 63. – P. 102960.

9. Gerdpratoom, N. Decentralized NMPC-based flock navigation with obstacle avoidance / N. Gerdpratoom, K. Yamamoto // Frontiers in Robotics and AI. – 2025. – Vol. 12. – P. 1540808.

10. Kong, F. Flocking with obstacle avoidance for fixed-wing UAVs via NMPC / F. Kong [et al.] // 42nd Chinese Control Conference. 2023. – Pp. 5957–5962.

11. Cao, Y. Distributed Coordinated Tracking With Reduced Interaction / Y. Cao, W. Ren // IEEE Trans. Autom. Control. – 2012. – Vol. 57. Iss. 1. – Pp. 33–48.

12. Schulman, J. Proximal Policy Optimization Algorithms / J. Schulman [et al.]. – URL: <http://arXiv:1707.06347>. 2017.

13. Liu, J. Topology uniformity pinning control for multi-agent flocking / J. Liu [et al.] // Complex & Intelligent Systems. – 2024. – Vol. 10. – Pp. 2013–2027. – DOI: 10.1007/s40747-023-01253-7.

14. Kargar, E. MACRPO: Multi-agent cooperative recurrent policy optimization / E. Kargar, V. Kyrki // Frontiers in Robotics and AI. – 2024. – Vol. 11. – P. 139.

15. Belkin, U. V. Development and evaluation of decentralized control algorithms for robot swarms in emergency response scenarios / U. V. Belkin, A. A. Prihodskiy, S. A. Serikov // Izvestiya VSTU. – 2025. – No. 4(299). – Pp. 12–15. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-4-299-12-15.

16. Belkin, U. V. Improvement of decentralized swarm control methods for emergency response: a dispersion algorithm / U. V. Belkin, A. A. Prihodskiy, S. A. Serikov // Quality and Life. – 2025. – No. 2(46). – Pp. 63–70.

17. Belkin, U. V. Modeling collective behavior of swarm robotic systems in extreme environments / U. V. Belkin, A. A. Prihodskiy // Extreme Robotics. – 2025. – No. 1(36). – Pp. 134–143.

18. Belkin, U. V. Hybrid Swarm Control Based on Combining Visual and Communication Navigation in Uncertain Environments / U. V. Belkin, A. A. Prihodskiy, S. A. Serikov // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. – 2025. – Pp. 1–5. – DOI: 10.1109/WECNF65186.2025.11017149.

Статья поступила в редакцию 24.02.2026, доработана 05.03.2026, подписана в печать 16.03.2026

The article was submitted 24.02.2026, revised 05.03.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 531.32+629.735+681.5  
DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-41-48

Научная статья  
Original article

*А. С. Прокопов, С. О. Безусов, Е. С. Брискин, И. П. Вершинина*

### О ПЕРЕМЕЩЕНИИ ГРУЗА С ПОМОЩЬЮ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Алексей Сергеевич Прокопов, proas98@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается система транспортировки грузов с использованием группы беспилотных летательных аппаратов мультикоптерного типа. Для увеличения массы перемещаемого груза применяются несколько таких летательных аппаратов. Каждый летательный аппарат связан с грузом с помощью нерастяжимого троса. Проведено имитационное моделирование, при котором движение груза представляет собой дугу эллипса. Определены координаты каждого из летательных аппаратов в зависимости от времени.

**Ключевые слова:** транспортировка грузов, беспилотные летательные аппараты, уравнения движения, траектория движения, имитационное моделирование

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Администрации Волгоградской области (№ 25-29-20213, <https://rscf.ru/project/25-29-20213>).

**Для цитирования:** Прокопов А. С., Безусов С. О., Брискин Е. С., Вершинина И. П. О перемещении груза с помощью группы беспилотных аппаратов. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 41–48. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-41-48.

**Информация об авторах:**

**Алексей Сергеевич Прокопов** – аспирант кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

<https://orcid.org/0009-0005-5580-7877>

e-mail: proas98@mail.ru

**Сергей Олегович Безусов** – младший научный сотрудник кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

e-mail: seleron@list.ru

**Евгений Самуилович Брискин** – профессор, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-6409-4208>

e-mail: ebriskin@mail.ru

**Ирина Петровна Вершинина** – доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

<https://orcid.org/0009-0006-3719-1682>

e-mail: i\_vershinina@vstu.ru

**Вклад авторов:**

**А. С. Прокопов** – написание статьи, разработка программного обеспечения.

**С. О. Безусов** – написание статьи, разработка программного обеспечения.

**Е. С. Брискин** – определение цели работы, постановка задачи.

**И. П. Вершинина** – определение цели работы, постановка задачи.

*A. S. Prokopov, S. O. Bezusov, E. S. Briskin, I. P. Vershinina*

**ON CARGO MOVEMENT USING A GROUP OF UNMANNED VEHICLES**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Alexey S. Prokopov, proas98@mail.ru

**Abstract.** A cargo transportation system using a swarm of multicopter-type unmanned aerial vehicles is considered. To increase the mass of the cargo being transported, several such aircraft are used. Each aircraft is connected to the cargo via an inextensible tether. Simulation modeling was conducted, in which the cargo's movement was represented by an elliptical arc. The coordinates of each aircraft were determined as a function of time.

**Keywords:** cargo transportation, unmanned aerial vehicles, equations of motion, trajectory, simulation modeling

**Funding:** the research was funded by a grant from the Russian Science Foundation and the Administration of the Volgograd Region (No 25-29-20213, <https://rscf.ru/project/25-29-20213>).

**For citation:** Prokopov A. S., Bezusov S. O., Briskin E. S., Vershinina I. P. On Cargo Movement Using a Group of Unmanned Vehicles. Izvestia VSTU. 2026; 4(311): 41–48. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-41-48.

**About the Authors:**

**Alexey S. Prokopov** – Postgraduate Student of the Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU

<https://orcid.org/0009-0005-5580-7877>

e-mail: proas98@mail.ru

**Sergey O. Bezusov** – Junior Researcher of the Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU

e-mail: seleron@list.ru

**Evgeny S. Briskin** – D. Sc. (Phys.-Math), Professor of the Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-6409-4208>

email: ebriskin@mail.ru

**Irina P. Vershinina** – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU

<https://orcid.org/0009-0006-3719-1682>

email: dtm@vstu.ru

**Author contributions:**

**Alexey S. Prokopov** – article writing, software development.

**Sergey O. Bezusov** – article writing, software development.

**Evgeny S. Briskin** – definition of the study's objective, problem statement.

**Irina P. Vershinina** – definition of the study's objective, problem statement.

**Введение**

Перемещение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с грузом тестируется в разных регионах России и за рубежом. Такие перевозки наиболее востребованы в труднодоступных районах, где использование привычной транспортной логистики экономически нецелесообразно или затруднено из-за ландшафта, например в горных, сельских районах, регионах Крайнего Севера, через естественные преграды (такие как реки, озера, топи, болота, трясины) [1, 2]. В Китае специализирующиеся на доставке компании совершают около 200 полетов в день с максимальной грузоподъемностью 2,5 кг и дальностью 6 км.

Однотипные летательные аппараты мультикоптерного типа достаточно просты в производстве и имеют низкую стоимость по сравнению с другими типами БПЛА, но они обладают сравнительно малой грузоподъемностью. Поэтому транспортировка грузов большой массы с помощью таких БПЛА является актуальной задачей.

Для увеличения веса перевозимого груза используется группа летательных аппаратов, связанных с грузом нерастяжимыми тросами [3, 4]. Соответствующее управление БПЛА позволяет обеспечить задаваемую программную траекто-

рию груза [5, 6]. Распределение БПЛА осуществляется по дуге окружности основания конуса, в вершине которого находится перемещаемый груз, это позволяет распределить нагрузку на каждый летательный аппарат в равной степени. Обычно взлет и посадка БПЛА осуществляется на специально подготовленных площадках.

**Постановка задачи**

Рассматривается задача перемещения груза, моделируемого в виде материальной точки, группой БПЛА из начального положения в конечное.

Траектория движения груза задается с помощью уравнений:

$$\begin{aligned} x_0 &= x_0(t), \\ y_0 &= y_0(t), \\ z_0 &= z_0(t). \end{aligned} \tag{1}$$

Для обеспечения равномерного распределения нагрузки на все БПЛА вводится условие равенства усилий, возникающих в тросах:  $[T] = \text{const}$ .

Расчетная схема рассматриваемой механической системы и основные ее параметры представлены на рис. 1.

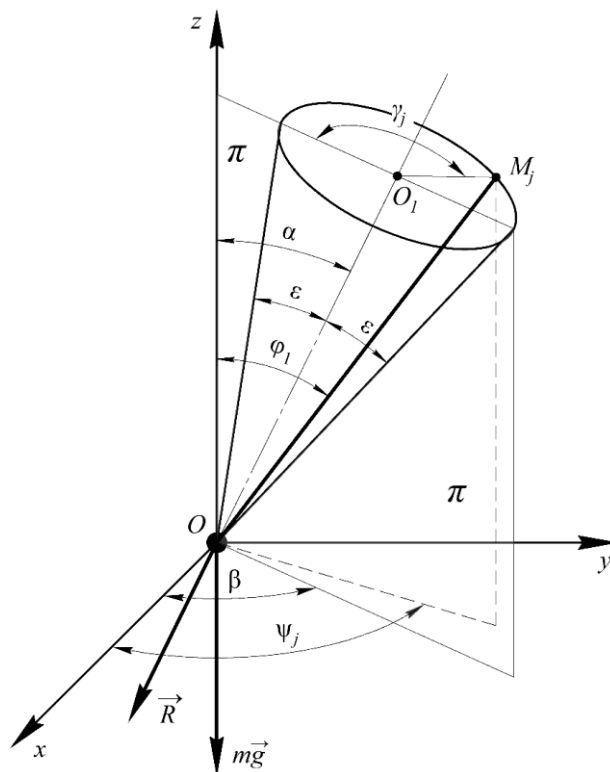


Рис. 1. Расчетная схема:

OO1 – ось конуса;  $\alpha, \beta$  – углы наклона оси конуса;  $M_j$  –  $j$ -ый БПЛА на оси основания конуса;

$\gamma_j$  – угол начального положения  $j$ -го БПЛА на оси основания конуса;

$\phi_j, \psi_j$  – углы наклона троса  $j$ -го БПЛА;  $\vec{R}$  – равнодействующая сила груза;  $\epsilon$  – угол раствора конуса

Координаты каждого  $j$ -ого БПЛА при транспортировке груза  $x_j(t)$ ,  $y_j(t)$ ,  $z_j(t)$  определяются по формулам с учетом координат  $x_0(t)$ ,  $y_0(t)$ ,  $z_0(t)$  (1)

$$\begin{aligned} x_j &= x_0 + l \sin \varphi_j \cos \psi_j, \\ y_j &= y_0 + l \sin \varphi_j \sin \psi_j, \\ z_j &= z_0 + l \cos \varphi_j, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $l$  – длина каждого из тросов;  $\varphi_j$ ,  $\psi_j$  – углы ориентации  $j$ -го БПЛА, совпадающие с углами ориентации троса, соединяющего аппарат с грузом.

Рассматривается траектория, которая получается путем интерполяции значений координат груза (рис. 2). Необходимо определить параметры горизонтального перемещения и максимальной высоты подъема груза.

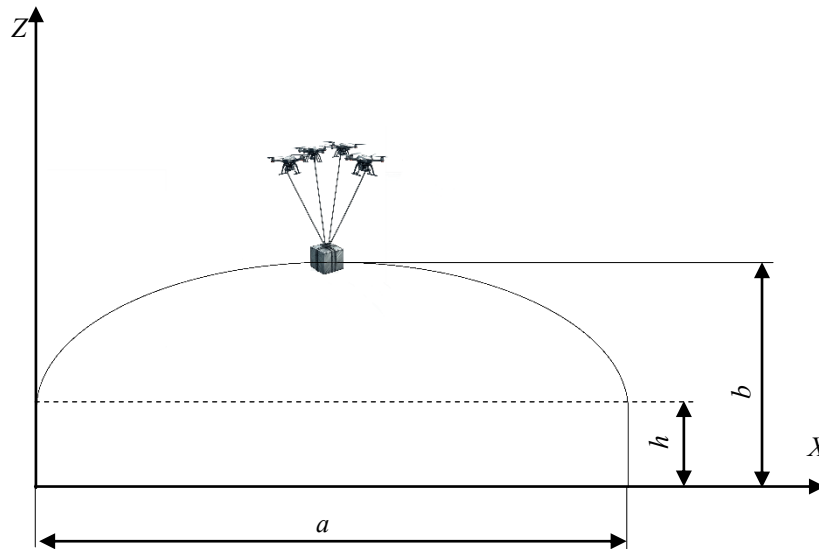


Рис. 2. Траектория движения груза:  
 $a$  – расстояние, на которое необходимо переместить груз;  
 $b$  – максимальная высота подъема;  $h$  – взлетная и посадочная высоты

В общем случае вертикальная координата начальной точки и конечной могут отличаться.

#### Имитационное моделирование движения

Имитационное моделирование проведено для массы груза 30 кг, перемещаемого четырьмя БПЛА весом 7 кг каждый. Груз закреплен с помощью тросов длиной 20 м. Угол смещения первого БПЛА задан нулевым.

Рассматриваются два варианта движения в вертикальной плоскости, отличающиеся массой груза, максимальной высотой подъема груза и допустимыми усилиями в каждом тросе. Основные параметры вариантов приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Основные параметры

Вариант	Масса груза, кг	Время, с	$b$ , м	$[T]$ , Н
1	30	500	100	300
2	40	500	120	400

Пример задания данных для интерполяции значений, используемых в программе на примере варианта 1 приведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Данные для варианта 1

$t$ , с	$x$ , м	$y$ , м	$z$ , м
0	0	0	0
30	0	0	10
250	200	0	100
470	400	0	10
500	400	0	0

В моменты времени 0–30 с и 470–500 с происходит взлет и посадка БПЛА с грузом, для этого используется линейная интерполяция. Взлетная и посадочная высоты одинаковы и составляют 10 м, это необходимо, чтобы груз не испытывал скоростей и ускорений в горизонтальной плоскости. На всех остальных промежутках используется метод построения гладкой кривой (сплайна), проходящей через заданные точки, с использованием полиномов третьей степени на каждом интервале.

Траектория движения груза для рассматриваемых вариантов представлена на рис. 3 в проекции на вертикальную плоскость.

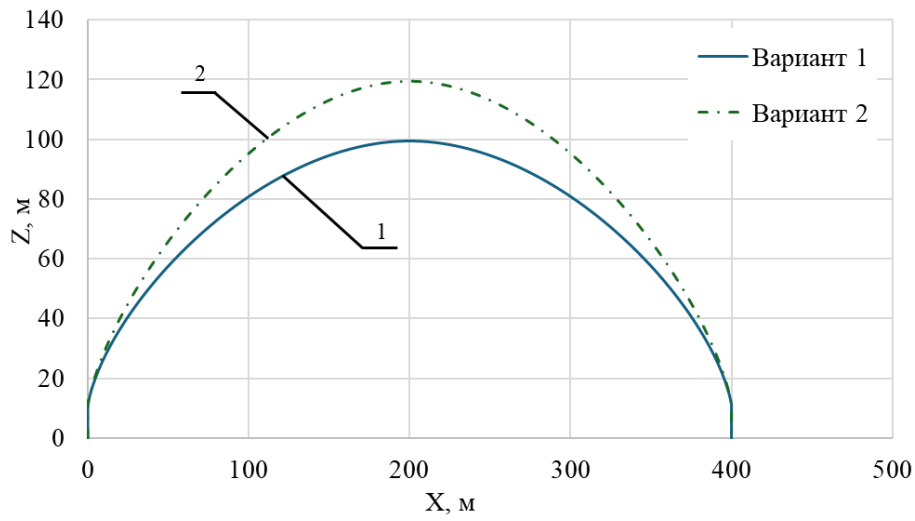


Рис. 3. Траектории движения груза для различных вариантов

Изменения координат каждого БПЛА для рассматриваемых вариантов представлены на рис. 4–7.

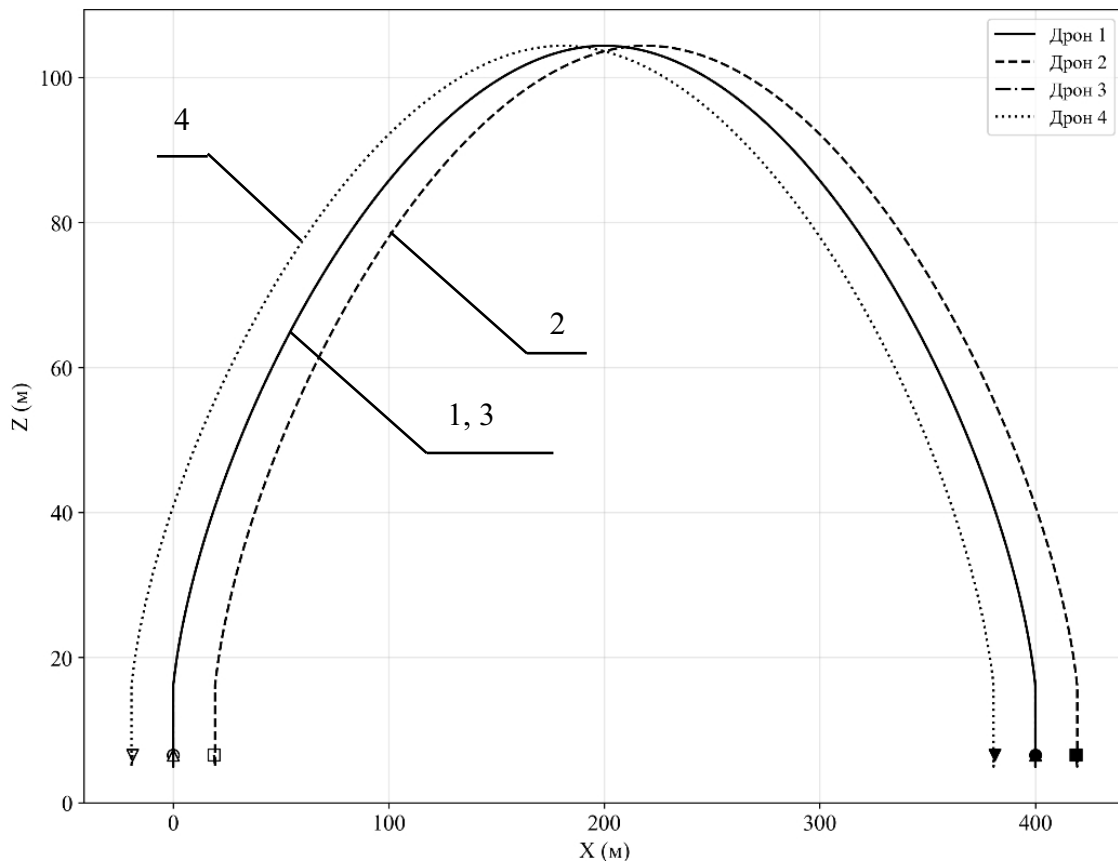


Рис. 4. Траектории БПЛА в вертикальной плоскости (вариант 1):  
1–4 – номера БПЛА

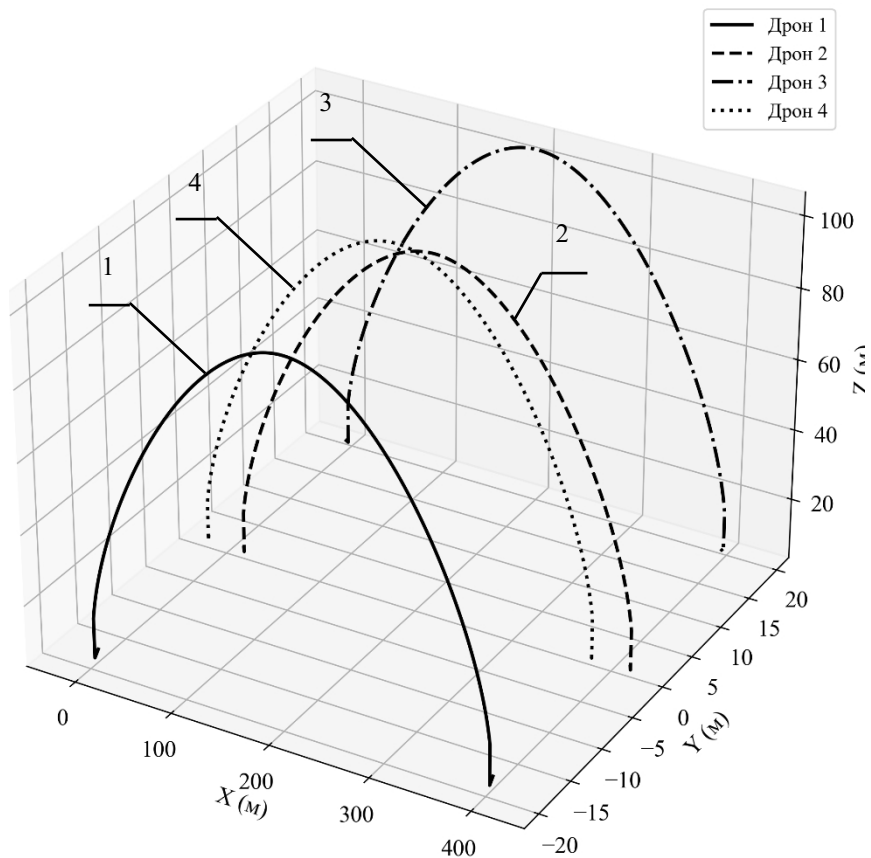


Рис. 5. Траектории БПЛА (вариант 1):  
1-4 – номера БПЛА

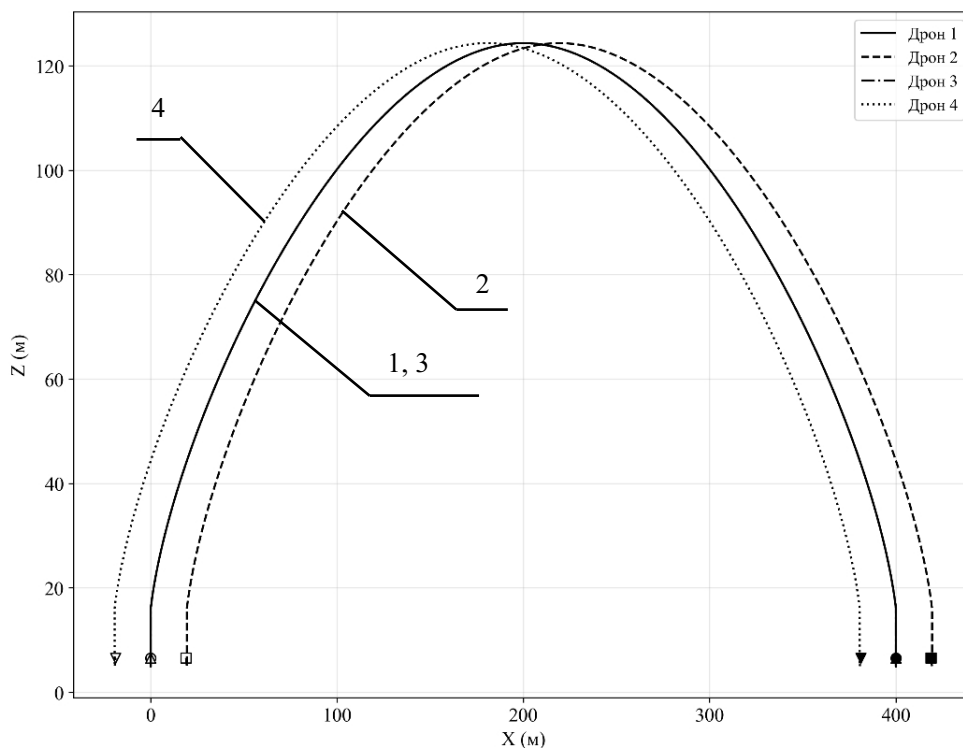


Рис. 6. Траектории БПЛА в вертикальной плоскости (вариант 2):  
1-4 – номера БПЛА

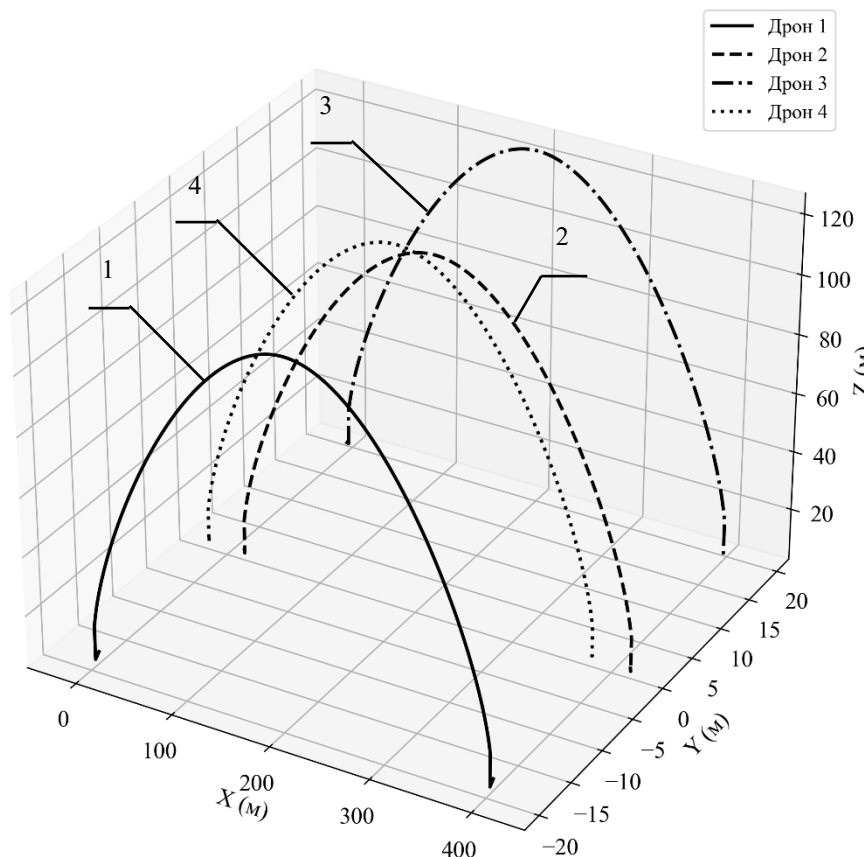


Рис. 7. Траектории БПЛА (вариант 2):  
1–4 – номера БПЛА

### Выводы

Применение группы БПЛА с грузом, например в сфере здравоохранения, позволит оперативно и экономично доставлять медикаменты и оборудование в труднодоступные районы для оказания неотложной помощи, что превосходит по эффективности стандартные методы логистики.

При анализе вариантов движения можно сказать, что время доставки в рассмотренных вариантах определяется исключительно горизонтальной составляющей скорости груза и не зависит от максимальной высоты подъема при прочих равных условиях.

Использование интерполяции при построении маршрута в отличие от задания уравнений движения позволяет задавать любое программное движение груза, в т. ч. обход сложных препятствий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ageeva, E. G. Перспективы применения БПЛА как средства доставки грузов / E. G. Ageeva, O. V. Evseev // Современные проблемы управления внешнеэкономической деятельностью : материалы междунар. научн. конф. 2018. Том Выпуск 68. – М. : Всероссийская академия

внешней торговли Министерства экономического развития РФ, 2018. – С. 161–167.

2. Полешикина, И. О. Применение беспилотных летательных аппаратов в системе доставки грузов Северного завоза / И. О. Полешикина // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-2(88). – С. 22–34.

3. Oliva-Palomo, F. Aerial Transportation Control of Suspended Payloads with Multiple Quadrotors / F. Oliva-Palomo, C. Sampedro, H. Bavle, J. L. Sanchez-Lopez, R. Fernandez-Feria, P. Campoy // arXiv. – 2023. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2301.11350.pdf>.

4. Jin, Xu. Adaptive Cooperative Load Transportation by a Team of Quadrotors With Multiple Constraint Requirements / Xu Jin, Zh. Hu // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2023. – Vol. 24. Iss. 1. – Pp. 801–814.

5. Maza, I. Multi-UAV cooperation and control for load transportation and deployment / I. Maza, A. Ollero, K. Konrad, M. Bernard // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2010. – Vol. 57. Iss. 1–4. – Pp. 417–449.

6. Liu, R. Virtual-Tube-Based Cooperative Transport Control for Multi-UAV Systems in Constrained Environments / R. Liu, P. Mao, X. Le, S. Gu, Y. Chen, Q. Quan // arXiv. – 2026. – arXiv:2602.05516 [cs.RO]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2602.05516>.

### REFERENCES

1. Ageeva, E. G. Prospects for the Use of UAVs as a Means of Cargo Delivery / E. G. Ageeva, O. V. Evseev // Modern Problems of Foreign Economic Activity Management: Proceedings of the International Scientific Conference. 2018. Vol. Iss. 68. – M. : All-Russian Foreign Trade Academy

of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation, 2018. – Pp. 161–167.

2. *Poleshkina, I. O.* Use of Unmanned Aerial Vehicles in the Cargo Delivery System of the Northern Delivery / I. O. Poleshkina // *World of Transport and Technological Machines*. – 2025. – Vol. 1-2. Iss. 88. – Pp. 22–34.

3. *Oliva-Palomo, F.* Aerial Transportation Control of Suspended Payloads with Multiple Quadrotors / F. Oliva-Palomo, C. Sampedro, H. Bavle, J. L. Sanchez-Lopez, R. Fernandez-Feria, P. Campoy // *arXiv*. – 2023. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2301.11350.pdf>.

4. *Jin, Xu.* Adaptive Cooperative Load Transportation by

a Team of Quadrotors With Multiple Constraint Requirements / Xu Jin, Zh. Hu // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2023. – Vol. 24. Iss. 1. – Pp. 801–814.

5. *Maza, I.* Multi-UAV cooperation and control for load transportation and deployment / I. Maza, A. Ollero, K. Kondak, M. Bernard // *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. – 2010. – Vol. 57. Iss. 1–4. – Pp. 417–449.

6. *Liu, R.* Virtual-Tube-Based Cooperative Transport Control for Multi-UAV Systems in Constrained Environments / R. Liu, P. Mao, X. Le, S. Gu, Y. Chen, Q. Quan // *arXiv*. – 2026. – URL: <https://arxiv.org/abs/2602.05516>.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026, доработана 12.02.2026, подписана в печать 16.03.2026

The article was submitted 02.02.2026, revised 12.02.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 629.1.02

DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-48-53

Научная статья

Original article

*А. С. Прокопов<sup>1</sup>, Д. В. Бордюгов<sup>1</sup>, В. С. Прокопова<sup>2</sup>, Н. Р. Кадилханов<sup>1</sup>*

### ОБ УСТРОЙСТВЕ ДВУХСЕКЦИОННОГО РОБОТА И УПРАВЛЕНИИ ЕГО ДВИЖЕНИЕМ

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

<sup>2</sup> Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

✉ Алексей Сергеевич Прокопов, [proas98@mail.ru](mailto:proas98@mail.ru)

**Аннотация.** Рассматривается многосекционный робот, в состав которого входят две и более секций. Движение робота обеспечивается за счет согласованной работы актуатора и тормозных стоек, установленных на каждой секции. Применение тормозных стоек в рассматриваемом роботе позволяет снизить энергозатраты и обеспечивать надежный контакт с опорной поверхностью. Разработанная система управления позволяет эффективно маневрировать в условиях ограниченного пространства.

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

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Администрации Волгоградской области (№ 25-29-20213, <https://rscf.ru/project/25-29-20213>).

**Для цитирования:** Прокопов А. С., Бордюгов Д. В., Прокопова В. С., Кадилханов Н. Р. Об устройстве двухсекционного робота и управлении его движением. *Известия ВолгГТУ*. 2026; 4(311): 48–53. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-48-53

#### Информация об авторах:

**Алексей Сергеевич Прокопов** – аспирант кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

<https://orcid.org/0009-0005-5580-7877>

e-mail: [proas98@mail.ru](mailto:proas98@mail.ru)

**Денис Владимирович Бордюгов** – аспирант, преподаватель кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

<https://orcid.org/0009-0003-9500-2868>

e-mail: [denklopuk@gmail.com](mailto:denklopuk@gmail.com)

**Вероника Сергеевна Прокопова** – студентка лечебного факультета ВолгГМУ

e-mail: [pronika06@mail.ru](mailto:pronika06@mail.ru)

**Никита Романович Кадилханов** – лаборант-исследователь кафедры «Динамика и прочность машин», ВолгГТУ

e-mail: [han1003@yandex.ru](mailto:han1003@yandex.ru)

#### Вклад авторов:

**А. С. Прокопов** – написание текста статьи, разработка лабораторного макета и написание программного кода для него.

**Д. В. Бордюгов** – определение цели работы, написание текста статьи.

**В. С. Прокопова** – написание текста статьи, разработка лабораторного макета.

**Н. Р. Кадилханов** – написание текста статьи.

A. S. Prokopov<sup>1</sup>, D. V. Bordyugov<sup>1</sup>, V. S. Prokopova<sup>2</sup>, N. R. Kadilkhanov<sup>1</sup>

ABOUT THE STRUCTURE OF A TWO-SECTION ROBOT  
AND CONTROL OF ITS MOVEMENT

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

<sup>2</sup>Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

✉ Alexey S. Prokopov, proas98@mail.ru

**Abstract.** A multi-section robot consisting of two or more sections is considered. The robot's motion is achieved through the coordinated operation of an actuator and brake struts installed on each section. The use of brake struts in this robot reduces energy consumption and ensures reliable contact with the supporting surface. The developed control system allows for efficient maneuvering in confined spaces.

**Keywords:** two-section robots, holo-nomous communication, brake struts

**Funding:** the research was funded by a grant from the Russian Science Foundation and the Administration of the Volgograd Region No 25-29-20213, <https://rscf.ru/project/25-29-20213>.

**For citation:** Prokopov A. S., Bordyugov D. V., Prokopova V. S., Kadilkhanov N. R. On the design of a two-section robot and control of its motion. *Izvestiya VSTU*. 2026; 4(311): 48–53. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-48-53.

**Author Information:**

**Alexey S. Prokopov** – Postgraduate Student of the Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU  
<https://orcid.org/0009-0005-5580-7877>

e-mail: proas98@mail.ru

**Denis V. Bordyugov** – Postgraduate Student, Lecturer of the Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU

<https://orcid.org/0009-0003-9500-2868>

e-mail: denklopuk@gmail.com

**Veronika S. Prokopova** – Student of the Faculty of Medicine VSMU

e-mail: pronika06@mail.ru

**Nikita R. Kadilkhanov** – Laboratory researcher of the Department of Dynamics and Strength of Machines, VSTU

e-mail: han1003@yandex.ru

**Author Contributions:**

**Alexey S. Prokopov** – Writing the article, developing the laboratory model, and writing the program code for it.

**Denis V. Bordyugov** – Defining the purpose of the work, writing the article.

**Veronika S. Prokopova** – article writing, laboratory layout development.

**Nikita R. Kadilkhanov** – article writing.

**Введение**

Известны мобильные роботы с различными типами движителей, приводами и системами управления движением. Роботы с тормозными стойками обладают рядом преимуществ. Тормозные стойки обеспечивают надежный контакт с опорной поверхностью. Робот приводится в движение за счет сил, приложенных к внутреннему телу. Для обеспечения перемещения робота по той или иной траектории необходимо обеспечить соответствующее управление движением внутренних тел [1–3].

Капсульные роботы с тормозными стойками обеспечивают движение в любом направлении с минимальным проскальзыванием движителей, минимизируя трение и энергозатраты. Благодаря простой конструкции без сложных передаточных механизмов они подходят для ряда задач, например для диагностики состояния человека [4–6].

Примером капсульного робота является робот, разработанный в ВолгГТУ, со стационар-

ным движением внутреннего тела и с тормозными стойками, каждая из которых в соответствующий момент времени может обеспечивать надежный контакт с опорной поверхностью. Внутреннее тело создает инерционную силу, а тормозные стойки поочередно взаимодействуют с опорной поверхностью, что позволяет роботу совершать определенное программное движение. Смена тормозных стоек позволяет обеспечивать маневренность, близкую к идеальной [7].

Недостаток однокапсульных роботов состоит в том, что с ростом массы перемещаемого груза, увеличиваются размеры робота, что ухудшает его маневренность. Для решения этой задачи используются многосекционные роботы, например, змееподобные. Но у змееподобных роботов при движении наблюдается отклонение от прямолинейного движения и значительные потери на трение. Следовательно, улучшение маневренности и снижение энергозатрат для многосекционных роботов является актуальной задачей

### Лабораторная модель двухсекционного робота

Подготовлен лабораторный макет много-секционного робота и разработано программное обеспечение (ПО) для микросхемы с целью проведения лабораторных исследований маневренности и энергозатрат.

Рассматриваемый робот состоит из двух

секций (ведущей и ведомой). При движении робота наблюдается отклонение от прямолинейного движения, как и у змееподобных, которое прямо пропорционально изменению длины актуатора, соединяющего геометрические центры секций.

Лабораторный макет двухсекционного робота представлен на рис. 1.

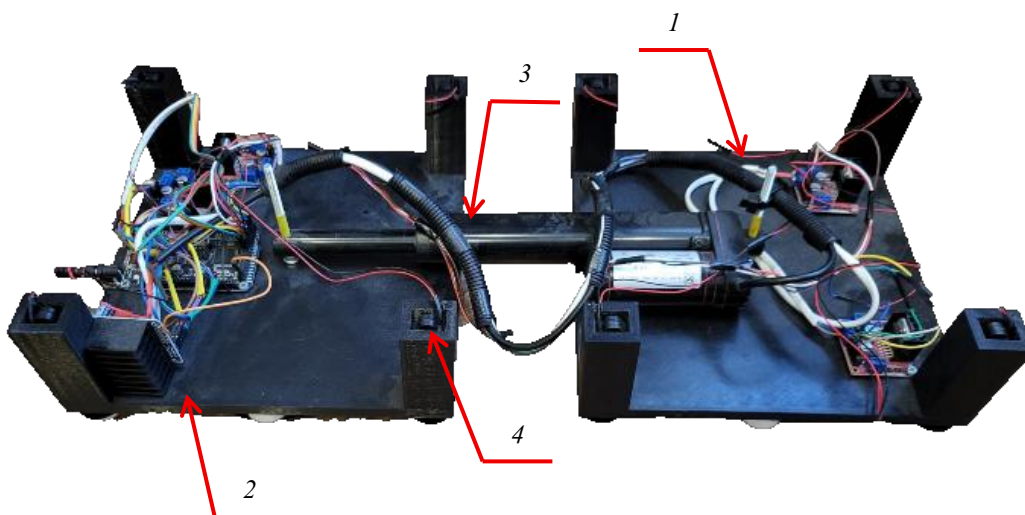


Рис. 1. Двухсекционный робот:  
1 – ведущая секция; 2 – ведомая секция; 3 – актуатор; 4 – тормозная стойка

Управление осуществляется с помощью платы ArduinoMega. В качестве тормозных стоек использованы линейные актуаторы. Для их управления применены четыре драйвера L298N. Закрепляемый в геометрических центрах секций и выполняющий роль внутреннего тела линейный актуатор имеет ход штока

150 мм. Управление им осуществляется с помощью драйвера BTS7960.

ПО разработано с помощью языка C++ с фреймворком Wiring.

На рисунке 2 представлен лабораторный макет двухсекционного мобильного робота в начальном положении и длина актуатора  $L$ .

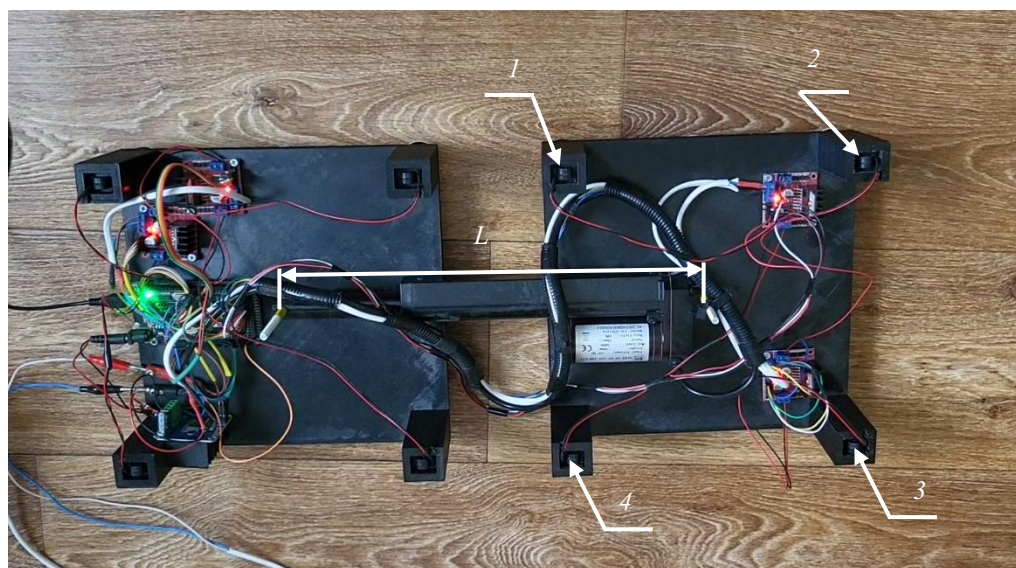


Рис. 2. Лабораторный макет в начальном положении:  
1, 2, 3, 4 – номера тормозных стоек

Движение такого робота происходит за счет изменения длины актуатора (расстояние между геометрическими центрами секций) и поворота секции вокруг тормозной стойки. При этом с опорной поверхностью взаимодействуют все тормозные стойки неподвижной секции и одна – подвижной секции. Цикл перемещения робота:

актуатор изменяет свою длину, из-за чего происходит поворот секции вокруг тормозной стойки, затем цикл повторяется.

На рисунке 3 представлено положение ведущей секции после удлинения актуатора на величину  $dL$  и поворота актуатора на угол  $\varphi$  вокруг первой тормозной стойки.

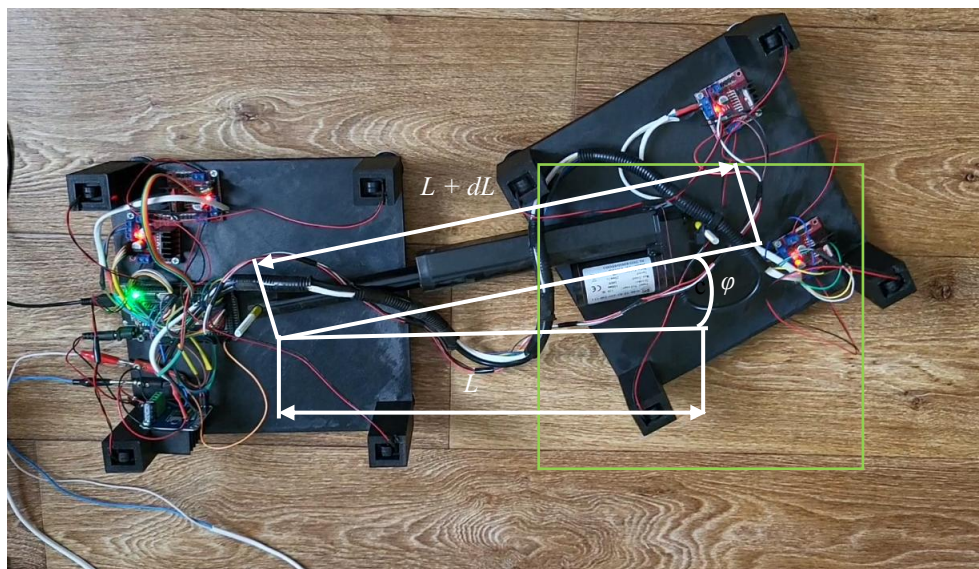


Рис. 3. Лабораторный макет после изменения длины актуатора

Программа для моделирования движения и управления исполнительными механизмами двухсекционного робота написана на языке C# [8]. Основным функционалом данной программы является имитационное моделирование движения робота и обеспечение согласованной работы актуатора и тормозных стоек для воспроизведения задаваемого движения. Программа автоматически генерирует управляющие команды для согласованной работы актуатора и тормозных стоек. Интерфейс программы представлен на рис. 4.

В блоке 1 приводятся результаты имитационного моделирования движения: номер заторможенной секции, номер заторможенной стойки на подвижной секции и величина изменения длины актуатора. Координаты геометрических центров секций задаются в блоке 2, расположение тормозных стоек для каждой секции заполняется при нажатии кнопки 3, для этого появляется отдельное окно. При нажатии кнопки 4 двухсекционный робот будет выполнять движения в соответствии с данными, записанными в блоке 1. Варианты автоматического движения представлены в блоке 5, координаты задаваемой точки для ведущей секции, а также вели-

чина изменения длины актуатора берется из данных, введенных в блок 6.

Управление подключением к лабораторному макету осуществляется блоком 7. Подключение к плате Arduino Mega осуществляется через COM-порт. Для подключения необходимо нажать кнопку «Доступные порты», выбрать из списка доступный порт, после чего нажать «Подключиться».

Через USB-соединение передаются строки команд, предварительно преобразованные в битовые последовательности. Все данные, поступающие в модуль, передаются по интерфейсу UART на плату Arduino Mega, которая управляет исполнительными механизмами робота. Движение робота будет осуществляться по заранее сгенерированным данным, приведенным в блоке 1.

Вводятся абсолютная и локальная системы координат. Абсолютная система координат связана с началом системы отсчета. Локальная система координат задана в геометрическом центре секции на нижней плоскости секции.

Координаты геометрических центров и тормозных стоек каждой секции в абсолютной системе координат, а также величина изменения длины актуатора выводятся в блок 8.

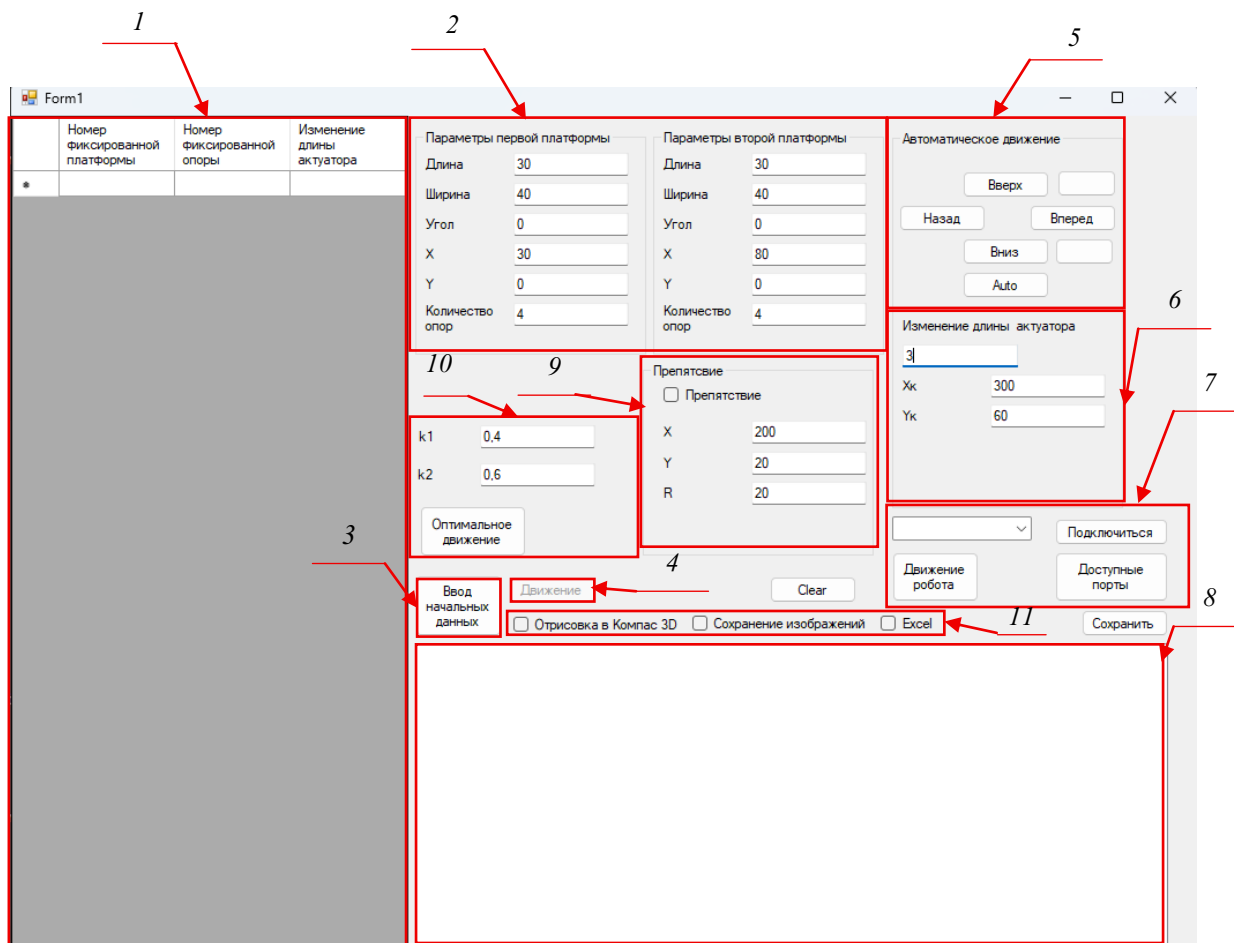


Рис. 4. Интерфейс программы моделирования движения

В программе реализована функция ввода препятствия в виде круга, параметры которого задаются в блоке 9, и его автоматического обхода по минимальному пути.

В блоке 10 производится расчет критерия оптимальности для введенных параметров двухсекционного робота. Весовые коэффициенты  $k_1$  угловых колебаний при движении, и  $k_2$  для энергетических затрат также задаются в блоке 10. При нажатии кнопки «Оптимальное движение» строятся графики зависимостей величин угловых колебаний и энергетических затрат от величины изменения длины актуатора.

Варианты вывода результатов имитационного моделирования движения представлены в блоке 11.

Нажатие кнопки «Clear» очищает данные движения в блоке 1. Кнопка «Сохранить» отвечает за сохранение данных, записанных в блок 8. Сохранение осуществляется в формате txt.

С целью упрощения все размеры представлены в безразмерных величинах.

## Выводы

Рассматриваемый робот в отличие от роботов, использующих традиционные типы движителей и сложные передаточные механизмы, обладает маневренностью близкой к идеальной, может быть миниатюризован.

Использование тормозных стоек, обеспечивающих надежный контакт робота с опорной поверхностью, повышает эффективность управления движением робота для выполнения заданной траектории и не требует учета действия силы тяжести при перемещении по наклонной поверхности.

Маневренность многосекционного робота выше, чем у традиционных транспортных средств в составе автопоезда, перемещающихся по поверхности без проскальзывания.

Разработанное ПО для системы управления исполнительными механизмами многосекционного робота позволяет снизить энергозатраты и получить маневренность, близкую к идеальной.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блехман, И. И. Вибрационное перемещение / И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе. – М. : Наука, 1964. – 410 с.
2. Нагаев, Р. Ф. Периодические режимы вибрационно-го перемещения / Р. Ф. Нагаев. – М. : Наука, 1978. – 160 с.
3. Черноусько, Ф. Л. Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией / Ф. Л. Черноусько, Н. Н. Болотник. – М. : Физматлит, 2022. – 464 с.
4. Поезжаева, Е. В. Капсульный робот для использования в гастроэнтерологии / Е. В. Поезжаева, Е. А. Закиров, М. В. Малев // Интернаука. – 2016. – № 12-1(22). – С. 120–121.
5. Zhang, C. Interaction model between capsule robot and intestine based on nonlinear viscoelasticity / C. Zhang, H. Liu, R. Tan, H. Li // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. – 2014. – Vol. 228. Iss. 3. – Pp. 287–296
6. Xie, W. Design and Validation of a Biosensor Implantation Capsule Robot / W. Xie, W. M. Lewis, J. Kaser [et al.] // Journal of Biomechanical Engineering. – 2017. – Vol. 139. Iss. 8. – P. 081003.
7. Бордюгов, Д. В. Мобильный робот / Д. В. Бордюгов, Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов; П. м. № 230052 U1 РФ, МПК В25J 9/10. ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2024.
8. Прокопов, А. С. Программа для имитационного моделирования движения двухсекционного робота / А. С. Прокопов, Е. С. Брискин; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025683771 РФ. ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2025.

## REFERENCES

1. Blekhan, I. I. Vibrational Movement / I. I. Blekhan, G. Yu. Dzhanelidze. – M. : Nauka, 1964. – 410 p.
2. Nagaev, R. F. Periodic Modes of Vibrational Movement / R. F. Nagaev. – M. : Nauka, 1978. – 160 p.
3. Chernousko, F. L. Dynamics of Mobile Systems with Controlled Configuration / F. L. Chernousko, N. N. Bolotnik. – M. : Fizmatlit, 2022. – 464 p.
4. Poezzhaeva, E. V. Capsule robot for use in gastroenterology / E. V. Poezzhaeva, E. A. Zakirov, M. V. Malev // Internauka. – 2016. – Vol. 12-1. Iss. 22. – Pp. 120–121.
5. Zhang, C. Interaction model between capsule robot and intestine based on nonlinear viscoelasticity / C. Zhang, H. Liu, R. Tan, H. Li // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine. – 2014. – Vol. 228. Iss. 3. – Pp. 287–296
6. Xie, W. Design and Validation of a Biosensor Implantation Capsule Robot / W. Xie, W. M. Lewis, J. Kaser [et al.] // Journal of Biomechanical Engineering. – 2017. – Vol. 139. Iss. 8. – P. 081003.
7. Bordyugov, D. V. Mobile Robot / D. V. Bordyugov, E. S. Briskin, N. G. Sharonov; Utility Model No. 230052 U1 Russian Federation, IPC B25J 9/10. VSTU. – 2024.
8. Prokopov, A. S. Program for Simulation Modeling of the Motion of a Two-Section Robot / A. S. Prokopov, E. S. Briskin; certificate of State Registration of Computer Program No. 2025683771 Russian Federation. VSTU. – 2025.

Статья поступила в редакцию 14.02.2026, доработана 19.02.2026, подписана в печать 16.03.2026  
The article was submitted 14.02.2026, revised 19.02.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 62-522.2

DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-53-61

Научная статья  
Original article

А. Ф. Рогачев, Е. В. Мелихова, В. М. Габдерахманов

### ФИТОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ РАСТЕНИЙ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Россия

✉ Алексей Фруминович Рогачев, rafr@mail.ru

**Аннотация.** Робототехнические фитотронные системы в АПК обеспечивают снижение энергоемкости технологических процессов промышленного выращивания растений. Автоматизированное управление фитотронами с использованием мультимодальных искусственных нейронных сетей обеспечивает раннее выявление отклонений в развитии растений, способствуя ликвидации заболеваний и термотерапии.

**Ключевые слова:** фитотрон, нейросетевое управление, выявление заболеваний растений, задача множественной классификации

**Для цитирования:** Рогачев А. Ф., Мелихова Е. В., Габдерахманов В. М. Фитотронный комплекс с интеллектуальной системой выявления заболеваний растений на основе мультимодальной нейронной сети. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 53–61. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-53-61.

**Информация об авторах:**

**Алексей Фруминович Рогачев** – профессор, д-р техн. наук, профессор кафедры математического моделирования и информатики, ВолГАУ  
<https://orcid.org/0000-0002-3077-6622>  
e-mail: rafr@mail.ru

**Елена Валентиновна Мелихова** – доцент, д-р техн. наук, зав. кафедрой математического моделирования и информатики, ВолГАУ  
<https://orcid.org/0000-0002-4041-4270>  
e-mail: mel-v07@mail.ru

**Вадим Миннурович Габдерахманов** – аспирант кафедры математического моделирования и информатики, ВолГАУ

<https://orcid.org/0009-0001-8973-710X>

e-mail: gabderahmanov99@gmail.com

**Вклад авторов:**

**А. Ф. Рогачев** – определение цели работы, обработка и анализ результатов исследования, написание текста статьи.

**Е. В. Мелихова** – определение цели работы, обработка и анализ результатов исследования, составление статьи.

**В. М. Габдерахманов** – разработка кода программы, проведение экспериментов, обработка и анализ результатов исследования, участие в обсуждении результатов.

*A. F. Rogachev, E. V. Melikhova, V. M. Gabderakhmanov*

**PHYTOTRONIC COMPLEX WITH AN INTELLIGENT SYSTEM FOR DETECTING PLANT DISEASES BASED ON A MULTIMODAL NEURAL NETWORK**

**Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia**

✉ Aleksey F. Rogachev, rafr@mail.ru

**Abstract.** Robotic phytotronic systems in the agroindustrial complex ensure a reduction in the energy intensity of technological processes of intensive plant cultivation. Automated control of phytotrons using neural network computer vision provides early detection of abnormalities in plant development, contributing to the elimination of diseases and thermotherapy.

**Keywords:** phytotron, neural network control, identifying plant diseases, multi-classification task

**For citation:** Rogachev A. F., Melikhova E. V., Gabderakhmanov V. M. Phytotronic complex with an intelligent system for detecting plant diseases based on a multimodal neural network. *Izvestiya VSTU*. 2026; 4(311): 53–61. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-4-311-53-61.

**Information about the authors:**

**Aleksey F. Rogachev** – D. Sc. (Engineering), Professor in the Department of Mathematical Modeling and Informatics, VSAU

<https://orcid.org/0000-0002-3077-6622>

e-mail: rafr@mail.ru

**Elena V. Melikhova** – D. Sc. (Engineering), Head of the Mathematical Modeling and Informatics Department, VSAU

<https://orcid.org/0000-0002-4041-4270>

e-mail: mel-v07@mail.ru

**Vadim M. Gabderakhmanov** – Postgraduate Student of the Department of Mathematical Modeling and Informatics, VSAU

<https://orcid.org/0009-0001-8973-710X>

e-mail: gabderahmanov99@gmail.com

**Contribution of the authors:**

**Aleksey F. Rogachev** – defining the aim of the work, processing and analysis of the research results, writing the text of the article.

**Elena V. Melikhova** – defining the aim of the work, processing and analysis of the research results, drafting the article.

**Vadim M. Gabderakhmanov** – conducting experiments, processing and analysis of the research results, participation in the discussion of the results.

**Введение**

Повышение эффективности агропромышленного производства, включая минимизацию затрат энергетических ресурсов, обеспечивается техническими решениями на основе цифровых робототехнических систем и методов искусственного интеллекта (ИИ). Робототехнические системы на основе ИИ широко и успешно используют в аграрном производстве в целом и, в т. ч. для мониторинга развития биологичес-

ких объектов и управления их производством [1].

Внедрение интеллектуальных технологий позволяет повысить эффективность отраслей промышленного агропроизводства [2–4]. Робототехнические средства в растениеводстве обеспечивают основную обработку почвы, посев и уборку, внесение удобрений и другие технологические операции. В животноводстве – роботизацию таких трудоемких операций, как доение, уборка навоза, раздача кормов [5, 6].

Выращивание сельскохозяйственных растений в защищенном грунте, в т. ч. в теплицах, является эффективным, особенно в засушливых почвенно-климатических условиях [7, 8]. Например, в стенде для моделирования процессов выращивания используется система локального орошения, включающая управляемый электроприводной насос и мультиспектральные излучатели на телескопической стойке [9].

Важной проблемой применения фитотронных систем остается недостаточная адаптивность управления технологическими процессами выращивания растений. Одним из значимых рисков при использовании фитотронных комплексов является опасность поражения культурных растений специфическими заболеваниями. Поэтому создание автоматизированных средств выявления заболеваний растений в условиях закрытого грунта, использующих интеллектуальные методы CV, является актуальным и востребованным в агропроизводстве.

Конструктивно-технологические схемы робототехнических комплексов на основе фитотронов используют светодиодные облучатели, с длинами волн 445 нм (синий), 660 нм (красный), 520 нм (зеленый), 395 нм (УФ-А) [10]. Система управления может использовать методы CV и мультимодальные средства интеллектуального распознавания образов [5, 11, 12]. Несмотря на широкое использование в аграрном производстве робототехнических систем на основе ИИ [12–15], часть вопросов их совершенствования остаются нерешенными.

Целью исследования является совершенствование интеллектуальной CV-системы фитотрона на основе структурно-параметрического синтеза и оптимизации мультимодальной нейронной сети.

#### Методы и материалы

За основу совершенствования фитотронного комплекса, расширения его функциональных возможностей и повышения управляемости технологическим процессом принималась схема с нейросетевым управлением [16–18].

Фитотрон обеспечивает интенсивный процесс промышленного выращивания растений за счет микропроцессорного управления подсистемами увлажнения, кондиционирования и спектрального освещения [18]. Экспериментальный образец фитотрона, изготовленный на

кафедре математического моделирования и информатики ВолГАУ, осуществляет диагностику состояния растений, реализуемую подсистемой нейросетевого анализа в реальном времени (рис. 1).

Датчики температуры 10 и влажности воздуха 11, а также влажности 12 и кислотности почвы 13, заглубленные в вегетационные лотки 2, подключены ко входам 5 блока интеллектуального микропроцессорного управления 22. Блок 5, снабженный одноплатным мини-компьютером, например JetsonNano с операционной системой Linux, обеспечивает функционирование интеллектуальной ИНС.

Подсистема машинного зрения фитотрона включает RGB-камеру, выход которой подключен ко входу микропроцессорной системы. Программное обеспечение микропроцессорной системы реализует локальную нейронную сеть, разработанную для мониторинга состояния растений и выявления ранних признаков поражений растений вирусами.

Структура системы компьютерного зрения базировалась на предобученной нейросети ИНС, построенной на языке Python в среде Google Colaboratory, дополненной полносвязными слоями классификаторов. Базовыми моделями принимались EfficientNetB0, ResNet50, MobileNetV3 и MobileNetV2. Выходной слой Dense содержал 8 нейронов по числу распознаваемых классов, что позволяло постепенно уменьшать размерность пространства признаков и численно оценивать «уверенность» итоговой классификации нейросети.

Эксперименты проводились на рабочей станции с процессором Intel Core i7-1165G7 и 16 ГБ оперативной памяти. Программная реализация алгоритмов выполнена с использованием фреймворков TensorFlow, Keras и Scikit-learn для предобработки и оценки.

Обучение исследуемых моделей проводилось с использованием алгоритма Adam с начальной скоростью обучения  $Lr = 0,0001$  для MobileNetV2 и 0,001 для остальных. В качестве функции потерь использовалась категориальная перекрестная энтропия (categorical crossentropy). Для управления процессом обучения применялись методы адаптивного снижения скорости обучения (ReduceLRonPlateau) и ранней остановки (EarlyStopping).

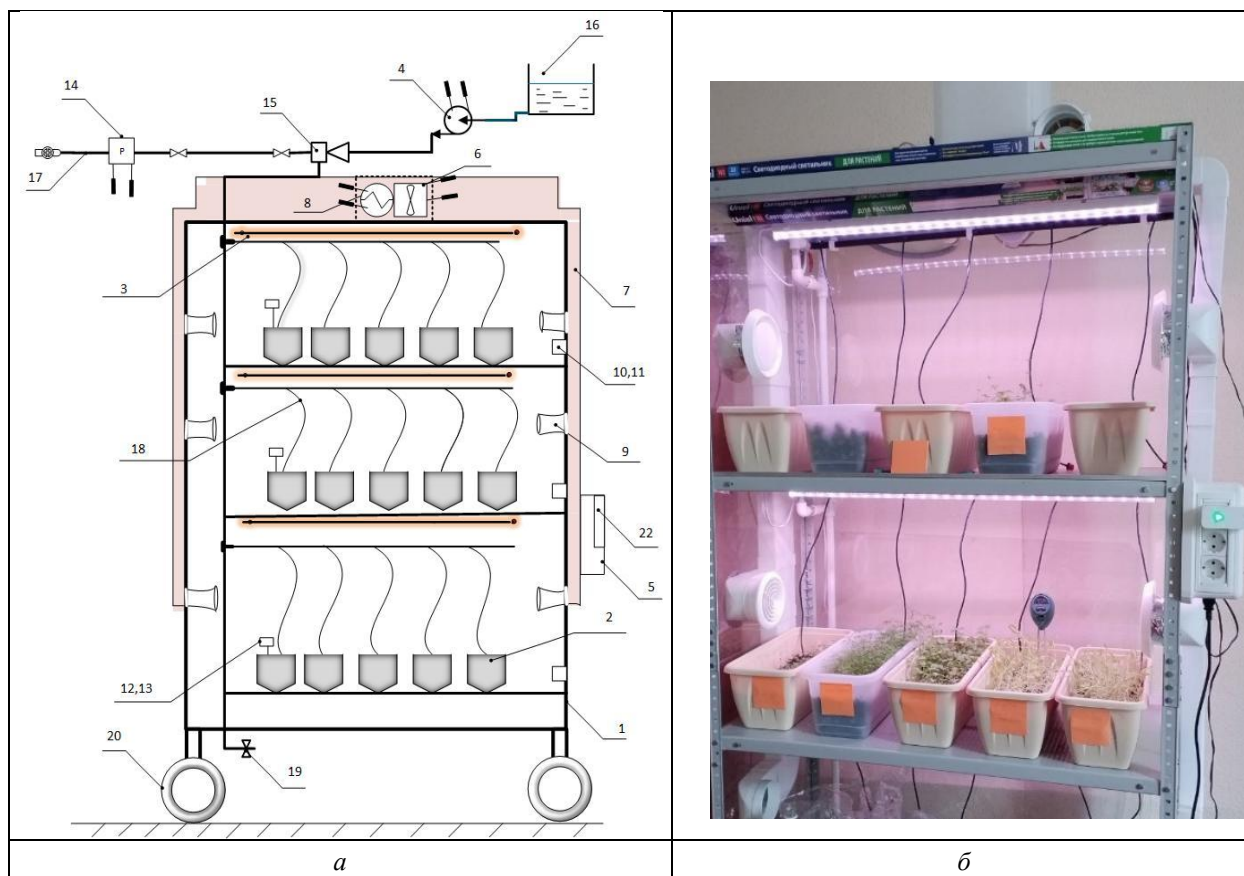


Рис. 1. Схематехническое решение фитотрона:

*а* – компоновка элементов и подсистем; *б* – структурно-технологическая схема: 1 – камера рабочая, 2 – лотки, 3 – спектральные светильники, 4 – насос питательного раствора, 5 – вход блока управления, 6 – вентиляторы, 7 – система подачи воздуха, 8 – подогреватели, 9 – анемостат, 12, 13 – датчики влажности и кислотности, 15 – эжектор, 16 – емкость с раствором, 18 – система подачи раствора, 22 – блок управления

В качестве метрик использовался расширенный набор показателей: Accuracy, Precision, Recall, F1-Score, а также матрица ошибок и анализ распределения значений «уверенности» модели. Показателями оценки уверенности являются MSP-максимальное значение после softmax-слоя, характеризующее уверенность в предсказанном классе (от 0 до 1), и Mutual Information (MI) – разница между предсказанной энтропией и условной энтропией предсказаний при dropout, выявляющая неопределенность. Использовались также Entropy – энтропия распределения вероятностей:

$$H(p) = -\sum p_i \log(p_i), \quad (1)$$

низкие значения которой указывают на высокую уверенность нейросети.

#### Формирование мультимодального датасета для обучения нейросети

Изображения для обучения нейросети брались из открытого DatasetCDRD, включающего

6400 реальных (не синтетических) изображений высокого разрешения (2296 × 1724 ppt) [4]. Каждый из классов включал выборку из 800 изображений (рис. 2), обеспечивая необходимую сбалансированность датасета. Разметка изображений по распознаваемым классам проводилась фитопатологами, что гарантирует ее высокую достоверность.

Массив изображений дополнен численными метаданными, синтезированными на основе фитопатологических моделей выявляемых заболеваний [19], приведенных в таблице ниже. Для синтеза использовались референтные диапазоны температурных режимов, показателей влажности и возрастных характеристик растений, характерные для оптимальных условий развития каждого патогена.

Алгоритм генерации агрономических метаданных включал значения температуры, влажности и возраста плода для каждого из заболеваний, диапазоны варьирования которых приведены в таблице.

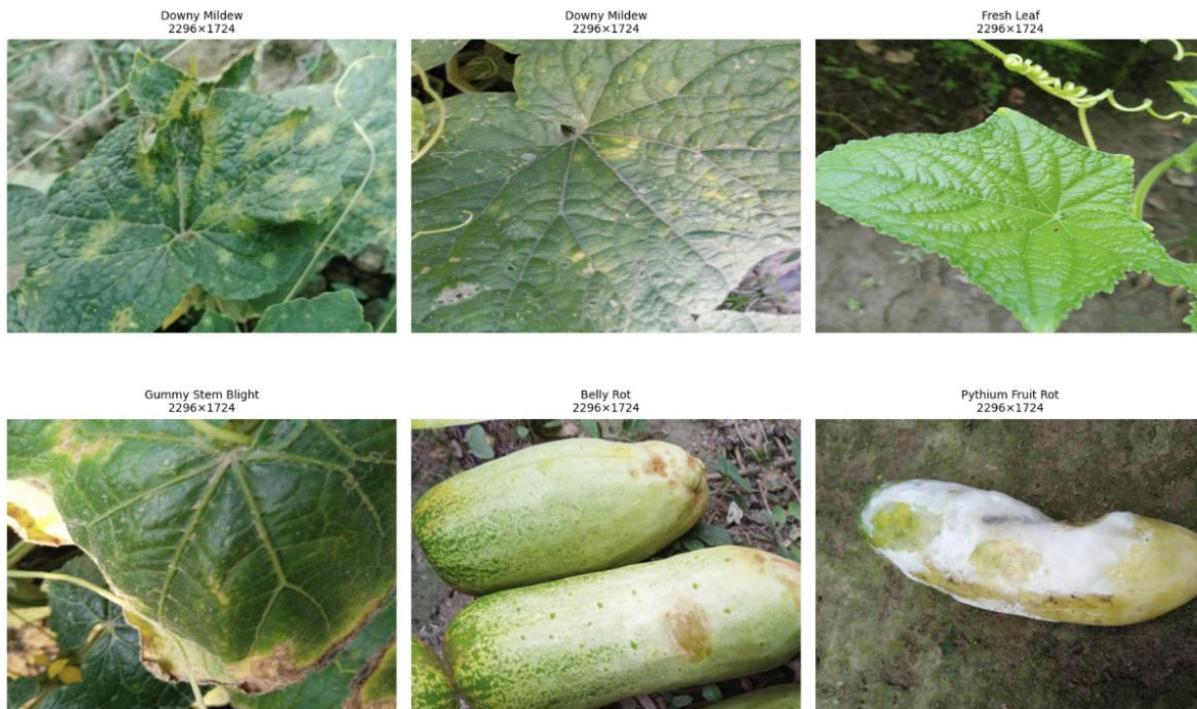


Рис. 2. Типичные изображения графической части датасета

Для каждого класса генерировалось по 800 образцов. Значения параметров создавались как случайные величины, равномерно распределенные

внутри соответствующих диапазонов, с добавлением нормального шума ( $\pm 0,5$  °C для температуры,  $\pm 1$  % для влажности,  $\pm 1$  день для возраста).

**Дополнительные метаданные, характеризующие распознаваемые классы**

Класс заболевания	Температура, °C	Влажность, %	Возраст плода, дни
<i>Anthracnose</i> (Антракноз)	23–27	90–100	35–55
<i>Bacterial Wilt</i> (Бактериальное увядание)	25–30	70–90	20–40
<i>Belly Rot</i> (Гниль донца плода)	28–32	85–95	5–15
<i>Downy Mildew</i> (Ложная мучнистая роса)	15–22	90–100	25–50
<i>Pythium Fruit Rot</i> (Питиозная гниль)	10–18	95–100	5–25
<i>Gummy Stem Blight</i> (Гоммоз стебля)	20–25	85–100	30–60
<i>Fresh leaves</i> (Здоровые листья)	22–26	60–75	20–60
<i>Fresh cucumber</i> (Здоровый огурец)	22–26	60–75	2–10

Полученные данные ограничивались физически возможными пределами: температура 10–35 °C, влажность 50–100 %, возраст 1–70 дней. Сгенерированный датасет сохранялся в формате CSV для последующего объединения с визуальными данными.

Для обеспечения соответствия между изображениями и синтетическими метаданными использовался метод последовательной нумерации образцов внутри каждого класса. Объединение выполнялось операцией inner join по полям с названием класса изображений и идентификатором.

**Архитектура разрабатываемых нейросетей для интеллектуального анализа состояния растений**

Для обработки мультимодальных данных реализован генератор данных Multimodal Data Generator, класс, обеспечивающий синхронную загрузку изображений и соответствующих метаданных. Генератор решает задачи: эффективное управление памятью за счет поточной загрузки подвыборок (batch); гарантия соответствия между визуальными данными и контекстной информацией; выполнение предобработки

в реальном времени. Это позволило работать с данными, превышающими объем доступной оперативной памяти, и обеспечить воспроизводимость эксперимента.

Визуальный поток обработки данных строился на основе моделей-энкодеров, предобученных на известном наборе ImageNet, дополненных слоями GlobalAveragePooling2D и Dense с функциями активации ReLU. Верхушка классификатора была отсечена (`include_top = False`), что позволило использовать выходные карты признаков размерности  $7 \times 7 \times 2048$  (рис. 3).

Далее следовала кастомная надстройка над базовой сетью. Слой глобального усредняющего пулинга (GlobalAveragePooling2D) преобразовывал

карты признаков в одномерный вектор длиной 2048. Полученный вектор подавался на полносвязный слой (dense) со 128 нейронами и функцией активации ReLU, после чего применялся слой регуляризации (dropout) с коэффициентом исключения  $p = 0,5$  для предотвращения переобучения. Параллельный поток обработки метаданных включал последовательность полносвязных слоев с постепенным уменьшением размерности признакового пространства. Объединение мультимодальных признаков осуществлялось операцией конкатенации на промежуточном уровне представлений с последующей обработкой через каскад полносвязных слоев с регуляризацией Dropout для предотвращения переобучения.

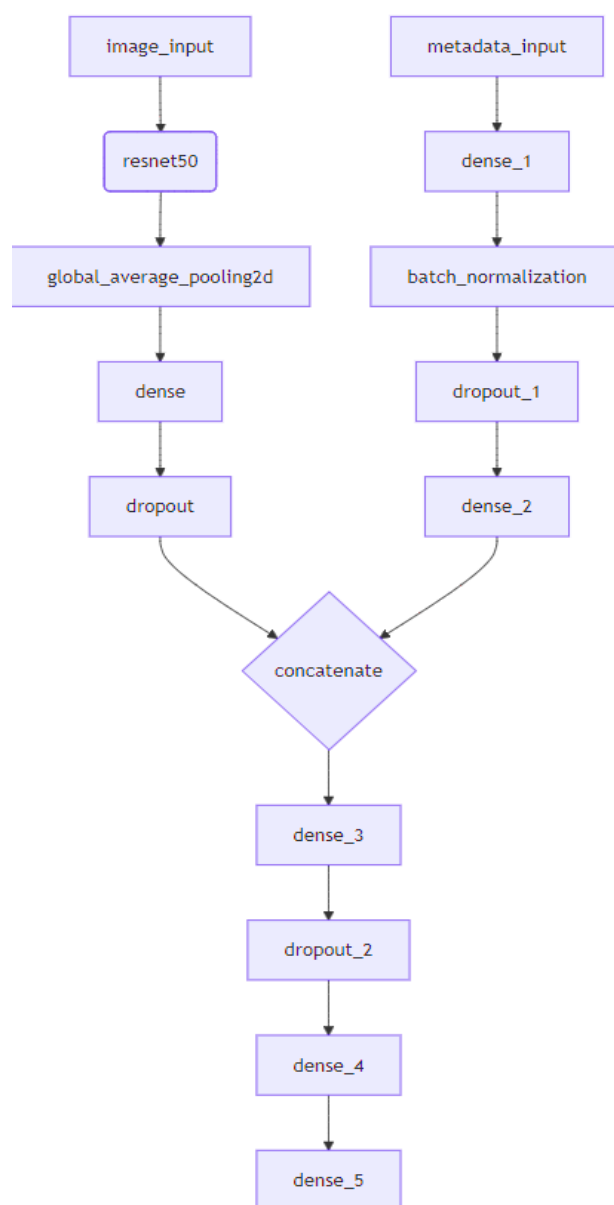


Рис. 3. Архитектура мультимодальной ИНС параллельно-последовательной структуры

Типовая диаграмма процесса обучения разработанных ИНС продолжительностью 30 эпох приведена на рис. 4.

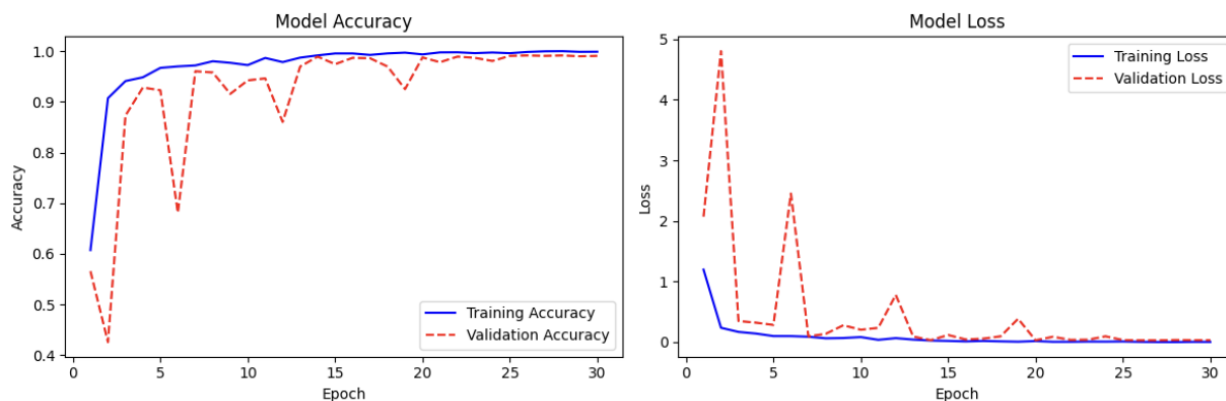


Рис. 4. Типичные диаграммы процесса обучения ИНС по метрикам accuracy и Loss, 30 эпох

В работе [20] показано, что метод нормализованной инициализации весов, согласно которому вектор  $W$  начальных значений весов ИНС определяется по формуле, приводит к снижению насыщения нейронов:

$$W \sim U \left[ -\frac{\sqrt{6}}{\sqrt{n_j + n_{j+1}}}, \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{n_j + n_{j+1}}} \right], \quad (2)$$

где  $U$  – функция равномерного распределения,  $n_j$  и  $n_{j+1}$  – число нейронов на текущем и следующем слоях.

При использовании функции активации ReLU веса можно принимать по зависимости:

$$W \sim U \left[ -\frac{2}{n_j}, \frac{2}{n_j} \right]. \quad (3)$$

### Обсуждение результатов

Полученные в экспериментах результаты нейросетевой классификации состояния и поражений растений позволяют рекомендовать исследованные архитектуры глубоких ИНС для использования в фитотронных комплексах. При этом разрешение цветных изображений размером  $224 \times 224$  является достаточным при условии размеров пораженных областей свыше 30 % анализируемой площади растения на снимке. Данное пороговое значение получено эмпирически на основе анализа изображений растений *Cucumber* и может варьироваться для сельскохозяйственных культур с иной морфологией листьев и плодов.

Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что интеграция графических изображений с агрономическими метаданными позволяет разрешить сложные случаи визуальной

Для снижения негативного влияния стохастичности выбора начальных весов нейросети можно использовать детерминированный подход.

схожести симптомов, в т. ч. на ранних стадиях. В частности, классы *Belly Rot* и *Pythium Fruit Rot*, имеющие схожие визуальные признаки, были классифицированы с большей точностью благодаря использованию дополнительных контекстных данных.

Максимальная достигнутая точность классификации составила 99,92 % на тестовой выборке объемом 1280 образцов (по 160 на каждый класс) при использовании мультимодальной архитектуры на основе MobileNetV3. Данный результат превосходит по точности унимодальные модели для классификации либо изображений, либо метаданных.

В качестве направления продолжения исследований намечено исследование влияния различных гиперпараметров глубокой ИНС гибридной архитектуры, построенной на основе параллельно-последовательных потоков, на показатели качества распознавания состояния растений, выращиваемых фитотронным методом.

### Выводы

Сопоставление мультимодального подхода с унимодальными архитектурами выявило его принципиальные преимущества. Модель, использующая только графические данные, достигла точности на 4–5 % ниже результатов мультимодальных конфигураций.

Выявлены существенные различия в динамике процесса обучения сравниваемых архитектур ИНС – мультимодальные решения демонстрировали более быструю сходимость и стабильность изменений метрик, причем унимодальная модель демонстрировала значительные колебания точности на валидационной выборке.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Трепуз, С. В.* Система автоматизированного управления фитотроном со светокультурой и гидропонной технологией / С. В. Трепуз, П. П. Долгих, В. А. Барсуков // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 2. – С. 143–149.
2. *Мартirosян, Ю. Ц.* Градиентный фитотрон / Ю. Ц. Мартirosян, Л. Ю. Мартirosян, Д. Ю. Мартirosян, В. Б. Акопян ; пат. РФ 207773U1. МПК A01G 9/24, A01G 31/02. ФГБНУ ВНИИСБ. – 2021.
3. *Порубов, Д. М.* Беспилотное мобильное транспортное средство для мониторинга сельскохозяйственных и лесных угодий / Д. М. Порубов, А. М. Беляев, П. О. Береснев [и др.] // Известия МГТУ МАМИ. – 2017. – № 1(31). – С. 47–56.
4. Cucumber Disease Recognition Dataset // Режим доступа: <https://www.kaggle.com/datasets/sujaykapadnis/cucumber-disease-recognition-dataset>.
5. *Рубцов, И. В.* Использование технологий специального назначения в сельскохозяйственной робототехнике / И. В. Рубцов, О. Г. Русанова, З. А. Годжаев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – Т. 12. № 1. – С. 37–41.
6. *Рыбаков, А. В.* Проектирование робототехнических манипуляторов с системой компьютерного зрения для сбора томатов / А. В. Рыбаков, А. М. Лихтер, А. Б. Погожева, А. В. Михайлова, А. Б. Дусалиев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 3(51). – С. 135–147.
7. *Петренко, В. И.* Метод управления робототехническим комплексом на основе глубокого обучения с подкреплением рекуррентных нейронных сетей для автоматического сбора тепличных культур / В. И. Петренко, Ф. Б. Тебueva, М. М. Гурчинский, В. О. Антонов // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений: сб. трудов VIII всероссийской науч. конф. – Уфа, 2020. – С. 78–85.
8. *Kai, Ch.* Research on the development trend of agricultural robot technology based on patent map / Chen Kai [et al.] // Journal of Agricultural Mechanization Research. – 2016. – Vol. 38. Iss. 09. – Pp. 1–9.
9. *Мелихова, Е. В.* Стенд для моделирования процессов влагообмена в почвогрунте при выращивании корнеплодов на капельном орошении / Е. В. Мелихова, А. Ф. Рогачев, В. В. Бородычев ; пат. РФ 173771U1. МПК G 01 N 33/24, A 01 G 25/16. ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. – 2017.
10. *Петрухин, В. А.* Фитотрон энергосберегающий универсальный модульный / В. А. Петрухин, Д. С. Ивушкин, А. С. Феклистов ; пат. РФ 206253U1. МПК A01G 31/02, A01G 7/045. ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. – 2021.
11. *Рогачев, А. Ф.* Моделирование динамики технологических процессов сельскохозяйственных погрузочно-транспортных агрегатов с гидроманипуляторами / А. Ф. Рогачев. – Волгоград : Изд-во ВГАУ, 2017. – 188 с.
12. New robotics projects by the European Union // European Commission. Режим доступа: <http://ec.europa.eu/digitalagenda/en/news/new-robotics-projects-2015>.
13. *Jianxia, Y.* International competition situation and research frontiers of agricultural robots / Yuan Jianxia [et al.] // Agricultural Engineering. – 2019. – Vol. 9. Iss. 09. – Pp. 1–5.
14. *Rogachev, A. F.* Neural Network Monitoring of Agricultural Plant Development Using Phytotronic Systems and Computer Vision / A. F. Rogachev, E. V. Melikhova, I. S. Belousov // Advances in Intelligent Systems and Computing : in book: Soft Computing for Security Applications. – 2023. – Pp. 609–620. DOI:10.1007/978-981-99-3608-3\_42.
15. *Melikhova, E. V.* Computer simulation and optimization of parameters of configuration of the contour of moistening under drip irrigation of agricultures / E. V. Melikhova, A. F. Rogachev // Studies in Computational Intelligence. – 2019. – Vol. 826. – Pp. 1193–1201.
16. *Гусенников, Е. Н.* Разработка автоматизированной системы термотерапии растений на базе фитотрона / Е. Н. Гусенников, С. И. Юран // Вестник НГИЭИ. – 2025. – № 10(173). – С. 59–70.
17. *Рогачев, А. Ф.* Фитотронный комплекс на основе системы технического зрения для интенсивного выращивания растений / А. Ф. Рогачев, Е. В. Мелихова, Д. В. Зеляковский // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 82–88.
18. *Мелихова, Е. В.* Вертикальное многоярусное устройство для выращивания растений / Е. В. Мелихова, А. Ф. Рогачев, Д. В. Зеляковский ; пат. РФ 217393U1. МПК A01G 31/06, A01G 9/26. ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. – 2023.
19. *Ziedan, E. H.* Distribution of epidemic diseases of cucumber under protective plastic houses in Egypt / E. H. Ziedan // Analele Universității din Oradea, Fascicula Biologie. – 2024. – Vol. XXXI. Iss. 1. – Pp. 15–23.
20. *Созыкин, А. В.* Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей / А. В. Созыкин // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2017. – Т. 6. № 3. – С. 28–59.

## REFERENCE

1. *Trepuz, S. V.* Automated control system of phytotron with light culture and hydroponic technology / S. V. Trepuz, P. P. Dolgikh, V. A. Barsukov // Modern science-intensive technologies. – 2022. – No. 2. – Pp. 143–149.
2. *Martirosyan, Yu. Ts.* Gradient phytotron / Yu. Ts. Martirosyan, L. Yu. Martirosyan, D. Yu. Martirosyan, V. B. Hakobyan ; patent of the Russian Federation No. 207773 U1. IPC A01G 9/24, A01G 31/02. FSBI VNIISB. – 2021.
3. *Porubov, D. M.* An unmanned mobile vehicle for monitoring agricultural and forest lands / D. M. Porubov, A. M. Belyaev, P. O. Beresnev [et. al.] // Izvestiya MGTU MAMI. – 2017. – Vol. 1. Iss. 31. – Pp. 47–56.
4. A set of data on the recognition of diseases of cucumbers // URL: <https://www.kaggle.com/datasets/sujaykapadnis/cucumber-disease-recognition-dataset>.
5. *Rubtsov, I. V.* The use of special-purpose technologies in agricultural robotics / I. V. Rubtsov, O. G. Rusanova, Z. A. Gojaev // Agricultural machinery and technology. – 2018. – Vol. 12. – Iss. 1. – Pp. 37–41.
6. *Rybakov, A. V.* Designing robotic manipulators with a computer vision system for harvesting tomatoes / A. V. Rybakov, A. M. Likhter, A. B. Pogozheva, A. V. Mikhailova, A. B. Dusaliev // Caspian Journal: Management and High Technologies. – 2020. – Vol. 3. Iss. 51. – Pp. 135–147.
7. *Petrenko, V. I.* A method for controlling a robotic complex based on deep learning with reinforcement of recurrent neural networks for automatic harvesting of greenhouse crops / V. I. Petrenko, F. B. Tebueva, M. M. Gurchinsky, V. O. Antonov // In the collection: Information technologies of intellectual decision support. Proceedings of the VIII All-Russian Scientific Conference. – Ufa, 2020. – Pp. 78–85.
8. *Kai, Ch.* Research of trends in the development of agricultural robotics based on a patent card / Chen Kai [et. al.] // Journal of research in the field of agricultural mechanization. – 2016. – Vol. 38. Iss. 09. – Pp.1–9.

9. Melikhova, E. V. A stand for modeling moisture exchange processes in the soil when growing root crops with drip irrigation / E. V. Melikhova, A. F. Rogachev, V. V. Borodychev ; patent of the Russian Federation No. 173771 U1. IPC G 01 N 33/24, A 01 G 25/16. Volgograd State Pedagogical University. – 2017.

10. Petrukhin, V. A. Energy-saving universal modular phytotron / V. A. Petrukhin, D. S. Ivushkin, A. S. Feklistov ; patent of the Russian Federation No. 206253U1. IPC A01G 31/02, A01G 7/045 Volgograd State Agrarian University. – 2021.

11. Rogachev, A. F. Modeling the dynamics of technological processes of agricultural loading and transport units with hydraulic manipulators / A. F. Rogachev. – Volgograd : Publishing House of the Volgograd State Agrarian University, 2017. – 188 p.

12. New projects of the European Union in the field of robotics // European Commission. – URL: <http://ec.europa.eu/digitalagenda/en/news/new-robotics-projects-2015>.

13. Jianxia, Y. The situation with international competition and the boundaries of research on agricultural robots / Y. Jianxia [et al.] // Agricultural Engineering. – 2019. – Vol. 9. Iss. 09. – Pp. 1–5.

14. Rogachev, A. F. Neural network monitoring of agricultural plant development using phytotronic systems and computer vision / A. F. Rogachev, E. V. Melikhova, I. S. Belousov // Achievements in the field of intelligent systems and computing technology. In the book: “Software Computing for Security Applications”. – 2023. – Pp. 609–620. DOI: 10.1007/978-981-99-3608-3\_42.

15. Melikhova, E. V. Computer modeling and optimization of the parameters of the humidification contour configuration during drip irrigation of agricultural crops / E. V. Melikhova, A. F. Rogachev // Research in the field of computational intelligence. – 2019. – Vol. 826. – Pp. 1193–1201.

16. Gusennikov, E. N. Development of an automated plant thermotherapy system based on a phytotron / E. N. Gusennikov, S. I. Yuran // Bulletin of the NGIEI. – 2025. – Vol. 10. Iss. 173. – Pp. 59–70.

17. Rogachev, A. F. Phytotronic complex based on a technical vision system for intensive plant cultivation / A. F. Rogachev, E. V. Melikhova, D. V. Zelyakovskiy // Proceedings of the Volgograd State Technical University. – 2023. – Vol. 4. Iss. 275. – Pp. 82–88.

18. Melikhova, E. V. Vertical multi-tiered structure for the development of the territory / E. V. Melikhova, A. S. Rogachev, D. V. Zelyakovskiy ; patent of the Russian Federation 217393 U1. MKP A01G 31/06, A01G 9/26. Volgograd State Agrarian University. – 2023.

19. Ziedan, E. H. The spread of epidemic diseases of cucumbers in protective plastic containers in Egypt / E. H. Ziedan // Oradea University, Fascicula Biology. – 2024. – Vol. XXXI. Iss. 1. – Pp. 15–23.

20. Sozykin, A. V. Review of methods of teaching deep neural networks / A. V. Sozykin // Bulletin of SUSU. Ser. Computational Mathematics and Computer Science. – 2017. – Vol. 6. Iss. 3. – Pp. 28–59.

Статья поступила в редакцию 14.02.2026, доработана 19.02.2026, подписана в печать 16.03.2026  
The article was submitted 14.02.2026, revised 19.02.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 519.713.1  
DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-61-67

Научная статья  
Original article

*М. А. Шереушев<sup>1</sup>, Д. И. Арабаджиев<sup>1,2</sup>*

### ОНТОЛОГИЧЕСКИ-ОБОСНОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ ЯЧЕЙКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

<sup>1</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,  
Москва, Россия

✉ Денис Игоревич Арабаджиев, [denisarabadzhev13@gmail.com](mailto:denisarabadzhev13@gmail.com)

**Аннотация.** Предложен метод моделирования взаимодействия человека и робота на основе стохастической сети Петри с онтологическими условиями активации переходов. Онтология задает контекст, роли и требования безопасности, обеспечивая логическую проверку действий. Модель позволяет оценивать время выполнения и риски, и повышает интерпретируемость по сравнению с классическими сетями Петри.

**Ключевые слова:** стохастические сети Петри, коллаборативная робототехника, онтология, имитационное моделирование, технологические процессы

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSFS-2024-0012).

**Для цитирования:** Шереушев М. А., Арабаджиев Д. И. Онтологически-обоснованное моделирование динамики коллаборативной ячейки с использованием стохастических сетей Петри. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 61–67. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-61-67

**Информация об авторах:**

**Мадин Артурович Шереужев** – доцент, канд. техн. наук, заведующий лабораторией МГТУ «СТАНКИН»

<https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>

e-mail: shereuzhev@gmail.com

**Денис Игоревич Арабаджиев** – аспирант МГТУ им. Н. Э. Баумана, инженер (НТР), МГТУ «СТАНКИН»

<https://orcid.org/0009-0000-5023-4073>

e-mail: denisarabadzhiiev13@gmail.com

**Вклад авторов:**

**М. А. Шереужев** – определение цели работы, анализ результатов исследования.

**Д. И. Арабаджиев** – проведение экспериментов, написание текста статьи.

*M. A. Shereuzhev<sup>1</sup>, D. I. Arabadzhiiev<sup>1,2</sup>*

**ONTOLOGY-BASED MODELING OF COLLABORATIVE  
CELL DYNAMICS USING STOCHASTIC PETRI NETS**

<sup>1</sup> **Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, Russia**

<sup>1,2</sup> **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia**

✉ Denis I. Arabadzhiiev, denisarabadzhiiev13@gmail.com

**Annotation.** A method for modeling human-robot interaction based on a stochastic Petri net with ontological conditions for transition activation is proposed. The ontology defines the context, roles, and safety requirements, providing logical verification of actions. The model allows for estimating execution time and risks and enhances interpretability compared to classical SSP.

**Keywords:** stochastic Petri nets, collaborative robotics, ontology, simulation modeling, technological processes

**Funding:** the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSFS-2024-0012).

**For citation:** Shereuzhev M. A., Arabadzhiiev D. I. Ontology-based modeling of collaborative cell dynamics using stochastic Petri nets. Izvestiya VSTU. 2026; 4(311): 61–67. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-61-67.

**Information about the authors:**

**Madin A. Shereuzhev** – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of Laboratory, MSUT “STANKIN”

<https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>

e-mail: shereuzhev@gmail.com

**Denis I. Arabadzhiiev** – Postgraduate Student, BMSTU, Engineer (NTR), MSUT “STANKIN”

<https://orcid.org/0009-0000-5023-4073>

e-mail: denisarabadzhiiev13@gmail.com

**Contribution of the authors:**

**Madin A. Shereuzhev** – defining the purpose of the work, analyzing the research results.

**Denis I. Arabadzhiiev** – conducting experiments, writing the text of the article.

**Введение**

Коллаборативные робототехнические ячейки требуют учета неопределенности, контекста и семантических свойств состояний, что недостаточно отражается в традиционных моделях. В работе предлагается объединить стохастические сети Петри (ССП) с онтологическим описанием ресурсов и условий активации переходов. Такая интеграция позволяет анализировать динамику в марковской постановке и оценивать надежность и безопасность процессов. Новизна подхода заключается в совместном учете количественных и семантических аспектов для повышения точности и предотвращения конфликтных ситуаций на этапе проектирования.

**Анализ существующих решений**

В последние годы исследования коллаборативных ячеек смещаются к интеллектуальным человеко-ориентированным системам, выходящим за рамки формального следования ISO/TS 15066. Работа [1] показала возможность адаптации траектории робота на основе прогноза действий оператора. В [2] предложили proactive-архитектуру 5С с оценкой намерений, но проблема формальных гарантий безопасности остается открытой. Обзор [3] подчеркивает потенциал гибридных кибер-физических архитектур и стохастических планировщиков, указывая на дефицит унифицированных метрик доверия.

В индустрии 4.0 сети Петри применяются как модульные DES-модели и интегрируются с семантическими представлениями. Обзор [4] подтверждает эффективность инвариант-контроля для предотвращения взаимоблокировок, однако отмечает сложность онлайн-адаптации. В работе [5] автоматизирован синтез GSPN-миссий с учетом вероятностей и длительностей операций, а формальные методы анализа и супервизорного управления PN развиты в работах [6–9]. Стохастические PN, основанные на СТМС-анализе, позволяют количественно оценивать пропускную способность и надежность совместных операций [10].

Развитие коллаборативных систем тесно связано с онтологическими методами. Работы [11–13] демонстрируют, что интеграция семантики задач, ролей и среды повышает автономность, адаптивность и объяснимость поведения, а промышленные онтологии систематизированы и даны рекомендации по их повторному использованию. Практическая интеграция онтологий и планирования в перенастраиваемых ячейках показана в работе [14]. Работы российских авторов [15–17] подтверждают эффективность объединения онтологий с автоматами и сетями Петри.

Для количественной оценки эффективности и надежности коллаборативных ячеек применяются марковские методы. Так в работе [18] идет обобщение оптимизации политик в стохастической динамике, которая остается ключевой при росте размерности многоагентных моделей.

Интеграционные формализмы развиваются в направлении тесной связки ССП и онтологий, авторы предлагают семантические сети Петри с взаимосвязанными событиями и правилами [19], которые обеспечивают онлайн-проверку логических и временных ограничений и динамическую адаптацию поведения на базе актуальных знаний и событий.

В представленной литературе проявляется отсутствие универсальной архитектуры, способной одновременно хранить и обновлять доменные знания в онтологическом виде, моделировать стохастическую дискретно-событийную динамику взаимодействий и автоматически трансформироваться в исполняемый код для систем реального времени. Предлагаемая в данной статье методология направлена именно на закрытие этого тройственного разрыва, объединяя ССП модели с OWL-онтологией и задавая тем самым

интегрированный, адаптивный и верифицируемый каркас для коллаборативных робототехнических ячеек.

### Элементы стохастической сети Петри

Рассмотрим систему, в которой возможности робота и человека (их состояния и переходы) задаются через онтологию и субъектно-предикатные отношения. Это позволяет формализовать возможные комбинации разметок и переходов в виде сети Петри.

Места в сети Петри представлены индексами  $i = 1, 2, \dots, n$ . Пусть  $M(i)$  – число токенов в месте  $i$ , тогда состояние системы (разметка) описывается вектором  $M = (M(1), M(2), \dots, M(n))$ . Каждый переход сети Петри  $T_j$  (где  $j = 1, 2, \dots, m$ ) характеризуется входным вектором  $I_j^-$  – требуемые токены для включения перехода, выходным вектором  $I_j^+$  – число токенов, добавляемых в места после срабатывания переходов, инцидентным вектором  $C_j = I_j^+ - I_j^-$ , который определяет изменение разметки при срабатывании  $T_j$ . Переход  $T_j$  включен (enabled) в разметке  $M$ , если для каждого места  $i$  выполняется:

$$M(i) \geq I_{i,j}^-.$$

Если  $T_j$  срабатывает, то новая разметка вычисляется по правилу:

$$M' = M + C_j. \quad (1)$$

Каждому переходу сети сопоставляется интенсивность срабатывания. При наличии нескольких одновременно включенных переходов динамика определяется стандартной для стохастических сетей Петри конкуренцией экспоненциальных событий, что обеспечивает марковское представление процесса и возможность дальнейшего аналитического исследования.

Таким образом, при получении команды, инициирующей начальное состояние  $M_0$ , динамика выполнения технологического процесса представляется последовательностью переходов:

$$M_0 \xrightarrow{T_{j1}} M_1 \xrightarrow{T_{j2}} \dots \xrightarrow{T_{jk}} M_k,$$

где в каждом состоянии разметка обновляется по закону

$$M_n = M_{n-1} + C_{jn}.$$

В векторной форме можно записать систему уравнений:

$$\frac{d\pi(t)}{dt} = Q\pi(t), \quad (2)$$

где  $\pi(t)$  – вектор вероятностей по всем допустимым разметкам,  $Q$  – матрица генератора, формируемая стандартно по структуре сети и интенсивностям переходов. В дальнейшем выражение (2) используется для вычисления вероятностных метрик над разметками (транзитных и стационарных).

В классической сети Петри условие активации перехода определяется наличием достаточного числа токенов во входных местах. При интеграции онтологии к этой модели вводится дополнительный семантический слой, который уточняет, что токены (состояния или события) должны не только количественно удовлетворять требованиям, но и обладать определенными качественными (онтологическими) свойствами. Ниже приведен подробный разбор условий активации переходов с учетом онтологической информации.

#### Двухуровневая проверка включения перехода

Переход  $T_j$  считается включенным в текущей разметке  $M$  и онтологической базе знаний  $O$ , если одновременно выполняется условие:

$$\forall i \in Places : M(i) \geq I_{i,j}^-.$$

$$Enabled(T_j, M, O) \Leftrightarrow [\forall i : M(i) \geq I_{i,j}^-] \wedge (\bigwedge_{p \in Pre_j} p(M, O) = 1),$$

где  $\forall i : M(i) \geq I_{i,j}^-$  – проверка классического условия наличия токенов;  $\bigwedge_{p \in Pre_j} p(M, O)$  – совокупная проверка всех онтологических предикатов, отражающих качественные требования (состояние готовности, права, контекст выполнения и т. д.).

#### Обоснование методов

Предположим, что выполнение сложных технологических операций, например автоматизация покраски сложных объектов, таких как корабли, требует учета не только топологии поверхности, но и стохастических факторов (время выполнения операций, вероятность ошибок) и ограничений на параллелизм. Формально задачу можно описать как поиск оптимального распределения ресурсов  $R = \{r_1, r_2\}$  (человек, робот) на графе поверхности  $G = (V, E)$ , минимизирующего целевую функцию:

Это означает что для каждого входного места  $i$  требуемое количество токенов должно быть не меньше порогового значения, заданного входным вектором  $I_j^-$ .

Семантическая часть условия задается набором онтологических предикатов, проверяемых по базе знаний. Переход разрешается только при одновременном выполнении количественного условия по маркировке и качественных ограничений контекста.

#### Связывание онтологии с разметкой сети Петри

Чтобы интегрировать онтологическую информацию в модель, каждому токенов можно сопоставить семантическую метку (например, класс или атрибут, определенный в онтологии). Таким образом, каждый токен  $t$  в месте  $i$  может иметь метку  $l(t)$ , которая соответствует определенной сущности или состоянию (например, «робот: ready», «человек: idle»). При активации перехода проверяется, что набор токенов не только количественно достаточен, но и качественно соответствует требованиям, заданным через онтологию.

Для итоговой формализации условия активации запишем итоговое условие активации перехода  $T_j$  с учетом онтологии:

$$F = \alpha \cdot E[T_{total}] + \beta \cdot E[C_{total}], \quad (3)$$

где  $E[T_{total}]$  – ожидаемое время покраски,  $E[C_{total}]$  – ожидаемая стоимость,  $\alpha, \beta$  – весовые коэффициенты.

Интеграция онтологий и стохастических сетей Петри позволит декларативно моделировать ограничения и для задач, связанных с технологической обработкой поверхностей  $\forall e_{ij} \in E : \neg(P_{e\_работе\_i} \wedge P_{e\_работе\_j})$ , и автоматически генерировать исполняемые модели для произвольных конфигураций обрабатываемых объектов. Для задач класса «покраска сложного объекта» изначальная структура сети Петри неизвестна.

В прикладных задачах технологической обработки онтология задает топологию объекта, допустимые зависимости и параметры ресурсов, а стохастическая сеть Петри формирует исполняемую дискретно-событийную модель.

Параметры интенсивностей и вероятностей ошибок определяются по статистике или экспертно, после чего модель анализируется в марковской постановке для оценки ожидаемых затрат и времени при соблюдении ограничений безопасности и параллелизма.

Ограничение метода связано с ростом размерности пространства разметок при масштабировании задачи. На практике применяются стандартные ССП приемы сокращения в соотношении агрегации состояний при сохранении целевых метрик.

#### Экспериментальные исследования

Эксперименты выполнены в Webots на ПК (процессор Intel i5-12400F, 16 ГБ ОЗУ, Ubuntu 22.04, видеокарта GTX 1650 использовалась для рендера). Онтология OWL подготовлена

в Protege и подключалась через OWL API. ССП анализировались в CPN Tools GreatSPN, онтологические предикаты проверялись SPARQL (rdflib), управляющая логика реализована на Python 3.10 (Webots API), обратная кинематика – икру [8].

Проверка выполнена в виртуальном полигоне Webots с созданной коллаборативной ячейкой, представленной на рис. 1, в основе которой был робот CRX-10iA/L с электрическим параллельным захватом, конвейер подачи и конвейер отгрузки. Над общей зоной установлен RGB-датчик для детекции детали и инструмента у оператора. Робот подает и забирает комплекты, человек выполняет сборку. Геометрия и физические свойства сцены заданы вручную в файле .proto (параметры тел, связи и коллизии).

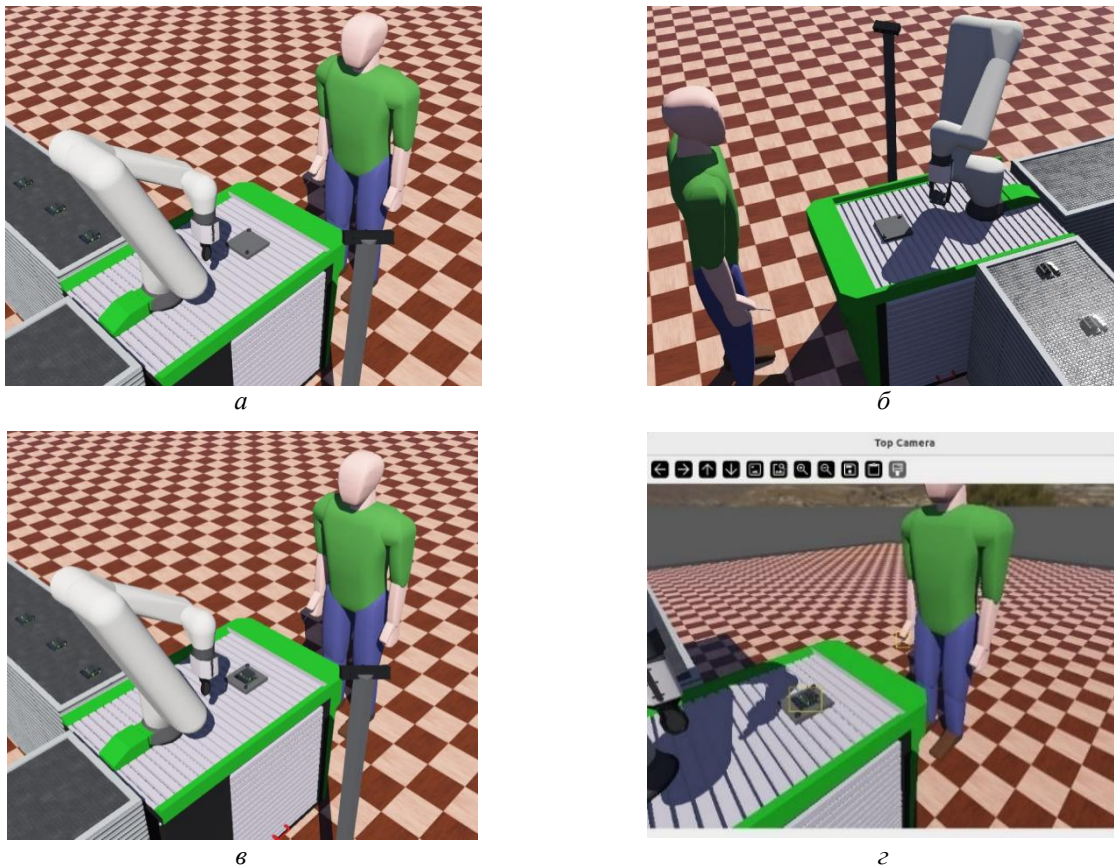


Рис. 1. Симуляция:

*а* – робот и человек свободны и ожидают начала работ; *б* – робот переносит деталь в совместную рабочую зону; *в* – деталь установлена перед человеком; *г* – камера на кронштейне детектирует наличие детали в совместной рабочей зоне

Для супервизорного контроля сближений использован Webots Supervisor API. Введены вспомогательные Solid-модели увеличенного габарита с отключенной физикой, а факт их пересечения трактовался как опасное приближение.

Цель эксперимента – проверить согласованность действий и устойчивость к нештатным ситуациям в гибридной модели ССП и онтологии. На рисунке 2 показан фрагмент сети, где запуск действия требует одновременно структурного условия по маркировке и семан-

тического условия, проверяемого SPARQL-запросом к базе знаний. Динамические предикаты зависят от времени и состояния агентов, верхний уровень онтологии задает правила безопасности, нижний – ограничения конкретной задачи, что позволяет разрешать параллельные операции только при выполнении обоих классов требований.

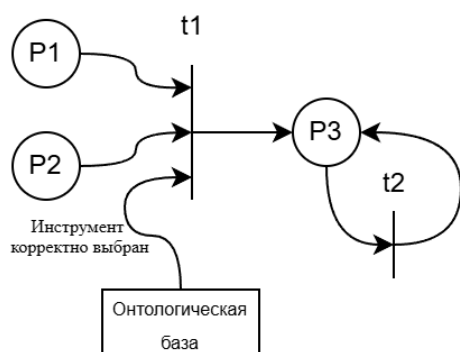


Рис. 2. ССП с онтологией

В имитационных испытаниях рассматривались нормальный режим (40 циклов) и аварийный режим (10 искусственно сгенерированных отказов датчиков). Оценивалось среднее время цикла, вероятность тупиковых состояний, соответствие требованиям безопасности (ISO). Логировались длительности и факты блокировок (порог по времени), события опасного сближения и активации защитных переходов  $T_{авария}$ . По последним вычислялся интегральный показатель безопасности.

Результаты, представленные в таблице, показывают сокращение времени операций примерно на 20 % по сравнению с моделью без онтологической интеграции (без учета незавершенных циклов), шестикратное снижение вероятности взаимных блокировок и рост доли корректных аварийных остановок до 98 % благодаря высокоприоритетному защитному переходу, инициируемому при обнаружении опасности и проверке предикатов зоны безопасности.

Ограничение связано с высокочастотными шумами датчиков, вызывающими «мигание» маркировок. Поэтому для устойчивости необходимы временные условия (дебаунс, гистерезис, «скользящие окна») [12].

#### Результаты эксперимента

Сценарий	Время, с	Тупики, %	Безопасность, %
Без онтологии	120 ± 15	12	78
С онтологией	95 ± 10	2	98

#### Заключение

Совмещение стохастических сетей Петри с онтологиями совместно учитывает вероятностную природу операций и семантические ограничения коллаборативных ячеек, обеспечивает формальное выявление критических состояний, оценку производительности в соотношении затрат и корректное применение контекстных правил безопасности. Интегрированная модель остается предсказуемой при вариативности поведения человека, сокращает время цикла покраски и снижает риск взаимоблокировок ниже нормативных порогов. Методика применима к широкому классу многоагентных процессов (сборка, сварка, агро- и сервисная робототехника) и интегрируется с ROS и ISO/TS 15066. Метод можно рассматривать как универсальное средство совместного моделирования стохастики и семантики, а перспектива развития – произвольные распределения длительностей, иерархические сети Петри и онлайн-идентификация параметров для самоадаптивных контроллеров в реальном времени.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Braglia, G.* Online motion planning for safe human-robot cooperation using B-splines and hidden Markov models / G. Braglia, M. Tagliavini, F. Pini, L. Biagiotti // *Robotics*. – 2023. – Vol. 12. Iss. 4. – Art. 118.
2. *Li, S.* Proactive human-robot collaboration: mutual-cognitive, predictable, and self-organising perspectives / S. Li, P. Zheng, S. Liu, Z. Wang // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2023. – Vol. 81. – Art. 102510.
3. *Xiao, J.* A comprehensive review on human-robot collaboration remanufacturing towards uncertain and dynamic disassembly / J. Xiao, K. Huang // *Manufacturing Review*. – 2024. – Vol. 11. – P. 17.
4. *Grobelna, I.* Challenges in application of Petri nets in manufacturing systems / I. Grobelna, A. Karatkevich // *Electronics*. – 2021. – Vol. 10. Iss. 18. – Art. 2305.
5. *Azevedo, C.* Petri net toolbox for multi-robot planning under uncertainty / C. Azevedo, A. Matos, E. Silva, [et al.] // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. Iss. 24. – Art. 12087.
6. *Marsan, M. A.* A class of generalized stochastic Petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems / M. A. Marsan, G. Balbo, G. Conte // *ACM Transactions on Computer Systems*. – 1984. – Vol. 2. Iss. 2. – Pp. 93–122.
7. *Murata, T.* Petri nets: properties, analysis and applications / T. Murata // *Proceedings of the IEEE*. – 1989. – Vol. 77. Iss. 4. – Pp. 541–580.
8. *Zhou, M.* Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems / M. Zhou, F. DiCesare. – Berlin : Springer, 1993. – 261 p.
9. *Huang, H.* Modeling and performance analysis of resource-sharing systems using stochastic Petri nets / H. Huang, M. Zhou // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part A*. – 2000. – Vol. 30. Iss. 5. – Pp. 507–517.
10. *Cassandras, C. G.* Introduction to Discrete Event Systems. 2nd ed. / C. G. Cassandras, S. Lafortune. – New York : Springer, 2008. – 588 p.

11. *Manzoor, S.* Ontology-based knowledge representation in robotic systems: a survey / S. Manzoor, R. Y. G. Rocha, S. Joo, [et al.] // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. Iss. 10. – Art. 4324. DOI: 10.3390/app11104324.
12. *Aguado, E.* Ontology-enabled processes for dependable robot autonomy: a survey / E. Aguado, V. Gomez, A. Hernandez, C. Rossi, R. Sanz // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2024. – Vol. 11. – Art. 1377897.
13. *Sapel, P.* A review and classification of manufacturing ontologies / P. Sapel, L. Molinas Comet, I. Dimitriadis, C. Hopmann, S. Decker // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2025. – Vol. 36. – Pp. 3669–3693.
14. *Schirmer, F.* Towards Dynamic Human-Robot Collaboration: A Holistic Framework for Assembly Planning / F. Schirmer, P. Kranz, C. G. Rose, [et al.] // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14. Iss. 1. – Art. 190.
15. *Шереужев, М. А.* Разработка элементов системы управления мобильным сельскохозяйственным роботом, работающим в группе / М. А. Шереужев, Н. П. Мостаков, С. Н. Воротников // *Modeling in Engineering*. – 2021. – С. 11–18.
16. *Шереужев, М. А.* Моделирование группового управления сельскохозяйственными роботами с использованием конечных автоматов и онтологий / М. А. Шереужев, Ф. В. Девяткин, Д. И. Арабаджиев, М. А. Шереужев // *Известия КБНЦ РАН*. – 2023. – № 6(116). – С. 247–263.
17. *Шереужев, М. А.* Формализация рабочего пространства и онтология технологического процесса для коллаборативной робототехнической ячейки / М. А. Шереужев, Л. А. Пак, П. Д. Карасев, А. О. Винокуров // *Известия КБНЦ РАН*. – 2022. – № 6(110). – С. 134–143/
18. *Puterman, M. L.* Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming / M. L. Puterman. – Hoboken : Wiley, 2014. – 692 p.
19. *Liu, H.* Modeling and validating temporal rules with semantic Petri net for digital twins / H. Liu, X. Song, G. Gao, [et al.] // *Advanced Engineering Informatics*. – 2023. – Vol. 57. – Art. 102099.
5. *Azevedo, C.* Petri net toolbox for multi-robot planning under uncertainty / C. Azevedo, A. Matos, E. Silva, [et al.] // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. Iss. 24. – Art. 12087.
6. *Marsan, M. A.* A class of generalized stochastic Petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems / M. A. Marsan, G. Balbo, G. Conte // *ACM Transactions on Computer Systems*. – 1984. – Vol. 2. Iss. 2. – Pp. 93–122.
7. *Murata, T.* Petri nets: properties, analysis and applications / T. Murata // *Proceedings of the IEEE*. – 1989. – Vol. 77. Iss. 4. – Pp. 541–580.
8. *Zhou, M.* Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems / M. Zhou, F. DiCesare. – Berlin : Springer, 1993. – 261 p.
9. *Huang, H.* Modeling and performance analysis of resource-sharing systems using stochastic Petri nets / H. Huang, M. Zhou // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part A*. – 2000. – Vol. 30. Iss. 5. – Pp. 507–517.
10. *Cassandras, C. G.* Introduction to Discrete Event Systems. 2nd ed. / C. G. Cassandras, S. Lafortune. – New York : Springer, 2008. – 588 p.
11. *Manzoor, S.* Ontology-based knowledge representation in robotic systems: a survey / S. Manzoor, R. Y. G. Rocha, S. Joo, [et al.] // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. Iss. 10. – Art. 4324. DOI: 10.3390/app11104324.
12. *Aguado, E.* Ontology-enabled processes for dependable robot autonomy: a survey / E. Aguado, V. Gomez, A. Hernandez, C. Rossi, R. Sanz // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2024. – Vol. 11. – Art. 1377897.
13. *Sapel, P.* A review and classification of manufacturing ontologies / P. Sapel, L. Molinas Comet, I. Dimitriadis, C. Hopmann, S. Decker // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2025. – Vol. 36. – Pp. 3669–3693.
14. *Schirmer, F.* Towards Dynamic Human-Robot Collaboration: A Holistic Framework for Assembly Planning / F. Schirmer, P. Kranz, C. G. Rose, [et al.] // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14. Iss. 1. – Art. 190.
15. *Shereuzhev, M. A.* Development of control system elements for a mobile agricultural robot operating in a group / M. A. Shereuzhev, N. P. Mostakov, S. N. Vorotnikov // *Modeling in Engineering*. – 2021. – Pp. 11–18.
16. *Shereuzhev, M. A.* Modeling group control of agricultural robots using finite-state machines and ontologies / M. A. Shereuzhev, F. V. Devyatkin, D. I. Arabadzhiev, M. A. Shereuzhev // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. – 2023. – Vol. 6. Iss. 116. – Pp. 247–263.
17. *Shereuzhev, M. A.* Workspace formalization and technological-process ontology for a collaborative robotic cell / M. A. Shereuzhev, L. A. Pak, P. D. Karasev, A. O. Vinokurov // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. – 2022. – Vol. 6. Iss. 110. – Pp. 134–143.
18. *Puterman, M. L.* Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming / M. L. Puterman. – Hoboken : Wiley, 2014. – 692 p.
19. *Liu, H.* Modeling and validating temporal rules with semantic Petri net for digital twins / H. Liu, X. Song, G. Gao, [et al.] // *Advanced Engineering Informatics*. – 2023. – Vol. 57. – Art. 102099.

## REFERENCE

1. *Braglia, G.* Online motion planning for safe human-robot cooperation using B-splines and hidden Markov models / G. Braglia, M. Tagliavini, F. Pini, L. Biagiotti // *Robotics*. – 2023. – Vol. 12. Iss. 4. – Art. 118.
2. *Li, S.* Proactive human-robot collaboration: mutual-cognitive, predictable, and self-organising perspectives / S. Li, P. Zheng, S. Liu, Z. Wang // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2023. – Vol. 81. – Art. 102510.
3. *Xiao, J.* A comprehensive review on human-robot collaboration remanufacturing towards uncertain and dynamic disassembly / J. Xiao, K. Huang // *Manufacturing Review*. – 2024. – Vol. 11. – P. 17.
4. *Grobelna, I.* Challenges in application of Petri nets in manufacturing systems / I. Grobelna, A. Karatkevich // *Electronics*. – 2021. – Vol. 10. Iss. 18. – Art. 2305.

Статья поступила в редакцию 01.10.2025, доработана 04.03.2026, подписана в печать 16.03.2026  
The article was submitted 01.10.2025, revised 04.03.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 62-523.8  
DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-68-76

Научная статья  
Original article

*М. А. Шереужев<sup>2</sup>, Ф. В. Девяткин<sup>1, 2</sup>, Д. И. Арабаджиев<sup>1, 2</sup>  
А. И. Дышеков<sup>2</sup>, М. А. Ушакова<sup>2</sup>*

**ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ  
НА ОСНОВЕ ЦВЕТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ И БАЙЕСОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ  
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
Москва, Россия

✉ Марьям Абилферзовна Ушакова, MarSieil@yandex.ru

**Аннотация.** Управление робототехническим комплексом в условиях неопределенности динамически изменяющейся среды с использованием формализма цветных сетей Петри. Идея заключается в том, чтобы интегрировать байесовскую фильтрацию сенсорных данных с механизмом принятия решений. Стохастическая модель восприятия учитывает вероятностный характер визуальной информации и влияние управляющих воздействий.

**Ключевые слова:** цветная сеть Петри, управление роботизированными системами, моделирование, Python 3, неопределенность, динамическая фильтрация данных, адаптивное управление

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSFS-2024-0012).

**Для цитирования:** Шереужев М. А., Девяткин Ф. В., Арабаджиев Д. И., Дышеков А. И., Ушакова М. А. Иерархическая система управления робототехническим комплексом на основе цветных сетей Петри и байесовской фильтрации в условиях неопределенности. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 68–76. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-68-76

**Информация об авторах:**

**Мадин Артурович Шереужев** – доцент, канд. техн. наук, заведующий Лабораторией промышленной робототехники МГТУ «СТАНКИН»

<https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>

e-mail: shereuzhev@gmail.com

**Федор Владимирович Девяткин** – аспирант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н. Э. Баумана, инженер (НТР), МГТУ «СТАНКИН»

<https://orcid.org/0009-0000-2639-9521>

e-mail: feodor-dev@ya.ru

**Денис Игоревич Арабаджиев** – аспирант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н. Э. Баумана, инженер (НТР), МГТУ «СТАНКИН»

<https://orcid.org/0009-0000-5023-4073>

e-mail: denisarabadzhev13@gmail.com

**Артур Изнаурович Дышеков** – канд. техн. наук, «Лаборатория промышленной, мобильной и специальной робототехники, мехатронных модулей и цифровых приводов» ЛПР (ТехП ЦТМ), МГТУ «СТАНКИН»

<https://orcid.org/0009-0002-4865-5041>

e-mail: a.I.dyshekov@gmail.com

**Марьям Абилферзовна Ушакова** – аспирант кафедры «Робототехника и машиностроение», МГТУ «СТАНКИН»

<https://orcid.org/0009-0003-4936-1448>

e-mail: MarSieil@yandex.ru

**Вклад авторов:**

**М. А. Шереужев** – разработка математического аппарата.

**Ф. В. Девяткин** – моделирование, написание программного обеспечения.

**Д. И. Арабаджиев** – проведение эксперимента.

**А. И. Дышеков** – разработка модуля API управления роботом-манипулятором.

**М. А. Ушакова** – обработка результатов.

*M. A. Shereuzhev<sup>2</sup>, F. V. Devyatkin<sup>1,2</sup>, D. I. Arabadzhiev<sup>1,2</sup>, A. I. Dyshekov<sup>2</sup>, M. A. Ushakova<sup>2</sup>*

**CONTROL OF A ROBOTIC SYSTEM UNDER UNCERTAINTY AND ENVIRONMENTAL VARIABILITY USING PETRI NETS**

<sup>1</sup> **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia**

<sup>2</sup> **Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, Russia**

✉ Maryam A. Ushakova, MarSieil@yandex.ru

**Abstract.** Control of a robotic complex in an uncertain and dynamically changing environment using the formalism of colored Petri nets. The idea is to integrate Bayesian filtering of sensory data with a decision-making mechanism. The stochastic perception model takes into account the probabilistic nature of visual information and the influence of control actions.

**Keywords:** colored Petri net, robotic system control, modeling, Python 3, uncertainty, dynamic data filtering, adaptive control

**Funding:** the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSFS-2024-0012).

**For citation:** Shereuzhev V. A., Devyatkin F. V., Arabadzhiev D. I., Dyshekov A. I., Ushakova M. A. Control of a robotic system under uncertainty and environmental variability using Petri nets. *Izvestiya VSTU*. 2026; 4(311): 68–76. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-68-76.

**Information about the authors:**

**Madin A. Shereuzhev** – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of Laboratory, MSUT “STANKIN”

<https://orcid.org/0000-0003-2352-992X>

e-mail: shereuzhev@gmail.com

**Fedor V. Devyatkin** – Postgraduate Student, Department of Robotics and Mechatronics, BMSTU, Engineer (NTR), MSUT “STANKIN”

<https://orcid.org/0009-0000-2639-9521>

e-mail: feodor-dev@ya.ru

**Denis I. Arabadzhiev** – Postgraduate Student, Department of Robotics and Mechatronics, BMSTU, Engineer (NTR), MSUT “STANKIN”

<https://orcid.org/0009-0000-5023-4073>

e-mail: denisarabadzhiev13@gmail.com

**Artur I. Dyshekov** – Cand. Sc. (Engineering), Lead Engineer (POP), MSUT “STANKIN”

<https://orcid.org/0009-0002-4865-5041>

e-mail: a.I.dyshekov@gmail.com

**Maryam A. Ushakova** – Postgraduate Student, Department of Robotics and Mechanical Engineering, MSUT “STANKIN”.

<https://orcid.org/0009-0003-4936-1448>

e-mail: MarSieil@yandex.ru

**Contribution of the authors:**

**Madin A. Shereuzhev** – Development of Mathematical Framework.

**Fedor V. Devyatkin** – Modeling, Software Development.

**Denis I. Arabadzhiev** – Conducting Experiments.

**Artur I. Dyshekov** – Development of the API Module for Manipulator Robot Control.

**Maryam A. Ushakova** – Processing of Results.

**Введение**

Развитие робототехнических комплексов связано с переходом к гибридным архитектурам, обеспечивающим работу в условиях стохастической неопределенности [1–4]. На предыдущем этапе работы [5] была реализована интеграция цветных сетей Петри и байесовской фильтрации с отображением апостериорных вероятностей в маркировку сети, что повысило устойчивость дискретного управления, однако динамика электроприводов учитывалась упрощенно.

В данной работе предлагается многоуровневая система, объединяющая вероятностную оценку состояния, цветные сети Петри и динамическую модель привода в пространстве состояний [6, 7]. Адаптивная коррекция условий активации переходов с учетом параметров приводов обеспечивает согласованность дискретной и непрерывной динамики и повышает устойчивость управления [8].

Целью работы является формализация и реализация иерархической системы управления, включающей высокоуровневую дискретную мо-

дель управления действиями с помощью сети Петри [9]. Работа направлена на объединение строгой дискретно-событийной модели поведения с непрерывной динамикой исполнительного устройства, а также обеспечение устойчивого выполнения манипуляционных операций при изменяющейся конфигурации среды при наличии шумов и вариативных начальных условий [10].

#### Постановка задачи

В качестве испытательного стенда используется робототехнический комплекс, включающий манипулятор с шестью степенями свободы, оснащенный схватом и видеокамерой, которая служит как источник информации о положении объектов [5]. Комплекс функционирует в условиях частичной неопределенности и шумов сенсорных данных и решает задачу последовательного перемещения разноцветных

объектов, произвольно размещенных в рабочем пространстве, в заданные целевые позиции (рис. 1, табл. 1).

Состояние манипулятора описывается вектором обобщенных координат  $q \in \mathbb{R}^6$ , управление – вектором моментов  $\tau$ . Положение схвата определяется прямой кинематикой  $x = f(q)$ , скорость – через якобиан  $\dot{x} = J(q)\dot{q}$ . Динамика задается уравнением Эйлера-Лагранжа:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau, \quad (1)$$

Управление формируется по ПИД-подобному закону с учетом эталонной траектории и реализуется методом вычисляемого момента:

$$\tau = M(q)v + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q), \quad (2)$$

где  $v$  содержит пропорционально-дифференциальную коррекцию.

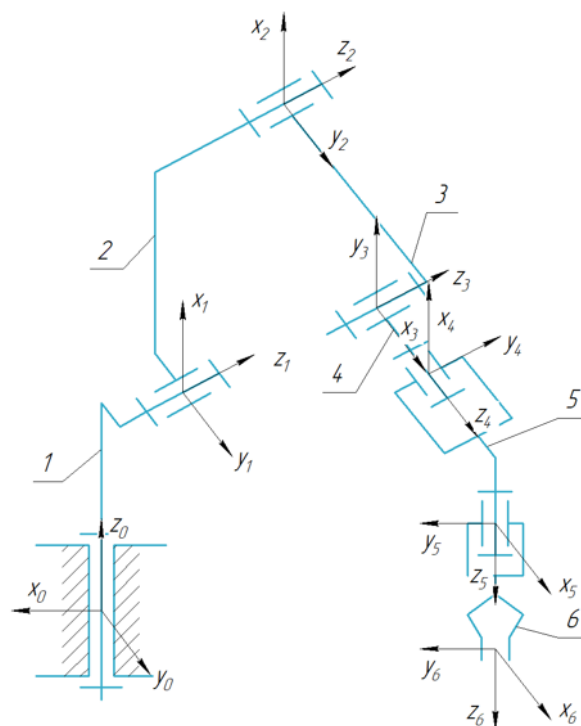
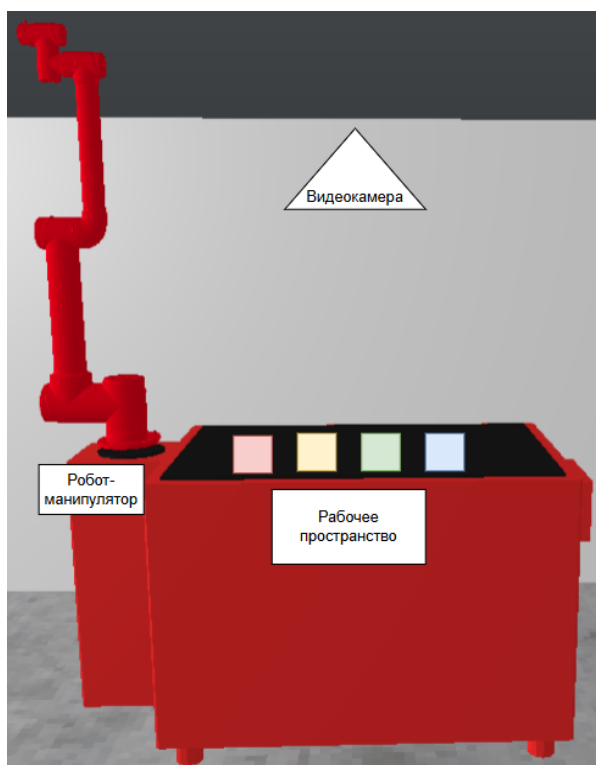


Рис. 1. Схема робототехнического комплекса и кинематическая схема

При синтезе учитываются кинематические, динамические и геометрические ограничения, что обеспечивает устойчивое позиционирование

схвата в изменяющейся и неопределенной среде (1) [7–11].

Таблица 1

Конфигурация перемещения кубиков из начальных позиции в конечные

Программа перемещения кубика	Начальная позиция кубика	Конечная позиция кубика	Цвет перемещаемого кубика
<i>t1</i>	<i>p1</i>	<i>p5</i>	красный
<i>t2</i>	<i>p1</i>	<i>p7</i>	желтый
<i>t3</i>	<i>p1</i>	<i>p8</i>	зеленый
<i>t4</i>	<i>p1</i>	<i>p6</i>	синий
<i>t5</i>	<i>p2</i>	<i>p5</i>	красный
<i>t6</i>	<i>p2</i>	<i>p7</i>	желтый
<i>t7</i>	<i>p2</i>	<i>p8</i>	зеленый
<i>t8</i>	<i>p2</i>	<i>p6</i>	синий
<i>t9</i>	<i>p3</i>	<i>p5</i>	красный
<i>t10</i>	<i>p3</i>	<i>p7</i>	желтый
<i>t11</i>	<i>p3</i>	<i>p8</i>	зеленый
<i>t12</i>	<i>p3</i>	<i>p6</i>	синий
<i>t13</i>	<i>p4</i>	<i>p5</i>	красный
<i>t14</i>	<i>p4</i>	<i>p7</i>	желтый
<i>t15</i>	<i>p4</i>	<i>p8</i>	зеленый
<i>t16</i>	<i>p4</i>	<i>p6</i>	синий

Модель восприятия сенсорной информации

В условиях шумов и неопределенности видеокамера используется как основной источник данных о цвете и наличии объектов, однако измерения искажаются освещением и перекрытия-

ми. Для повышения надежности применяется вероятностная модель дискретного состояния объекта  $x \in \{red, yellow, blue, green, no\_color, nothing\}$  с равномерным начальным распределением и матрицей зашумления наблюдений (табл. 2).

Таблица 2

Условная вероятность зашумления изображения, где  $z_t$  – измерение в момент  $t$ ,  $x_t$  – состояние в момент  $t$

$z_t \setminus x_t$	red	yellow	blue	green	no_color	nothing
def_red	0,7	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1
def_yellow	0,05	0,6	0,05	0,05	0,1	0,15
def_blue	0,05	0,05	0,7	0,05	0,05	0,1
def_green	0,05	0,05	0,05	0,6	0,1	0,15
def_no_color	0,05	0,05	0,05	0,05	0,5	0,3
def_nothing	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,9

Оценка состояния выполняется рекурсивным байесовским фильтром с учетом модели переходов  $p(x_t | x_{t-1}, u_{t-1})$  [10–12]. Изменение маркировки в сети Петри допускается только после 10 последовательных подтверждений наиболее вероятного состояния, что снижает влияние шумов. Отфильтрованные данные используются для локализации объектов, форми-

рования целевых точек и передачи в сеть Петри и регулятор манипулятора.

Модель верхнеуровневой логики системы управления

Управление робототехническим комплексом реализуется иерархически, включая дискретную логику, непрерывную динамику манипулятора и вероятностную обработку сенсор-

ных данных. Для формализации используется цветная сеть Петри  $\mathcal{N} = (P, T, F, M_0, C)$ , где позиции соответствуют возможным размещениям объектов и свободному состоянию манипулятора, переходы – операциям перемещения, а цветные токены {red, blue, yellow, green} кодируют тип объекта. Активация перехода возможна только при наличии нужного цветного токена и свободного манипулятора [13].

Начальная конфигурация позиций неизвестна

$$\min_{\tau(t), \mu} J = \sum_{j=1}^4 \delta(p(o_j, T), g_j) + \int_0^T (\alpha \|\tau(t)\|^2 + \beta \|\dot{q}(t)\|^2) dt, \quad (3)$$

где  $\delta(p, g) = 0$  если  $p = g$ , иначе – штраф за неверное размещение;  $\alpha, \beta$  – весовые коэффициенты;  $p(o_j, T)$  – позиция объекта в момент  $T$ .

Интеграция сети Петри, вероятностной оценки и динамического регулятора (2) обеспечивает устойчивое выполнение задачи в условиях неопределенности.

Предлагаемая система управления (рис. 2) имеет иерархическую структуру. Сеть Петри формирует дискретную последовательность

и оценивается по зашумленным наблюдениям камеры. Состояние системы включает конфигурацию объектов, координаты и скорость манипулятора. Целью является достижение заданного размещения объектов  $s(T) = \{(o_j, g_j)\}$  [14].

Задача управления сводится к поиску непрерывного управления  $\tau(t)$  и стратегии переключений сети Петри, минимизирующих ошибку размещения и энергетические затраты (3):

действий, байесовская фильтрация уточняет состояние объектов, а низкоуровневый модуль реализует непрерывное управление манипулятором. После активации перехода  $t_i$  задается целевая точка  $x_{target}$ , по которой решается обратная кинематическая задача  $x_{ref}(t) \rightarrow q_{ref}(t)$ , и по методу обратной динамики вычисляется управление  $\tau(t)$ . Движение считается выполненным при условии  $\|x(t) - x_{target}\| \leq \varepsilon$ .

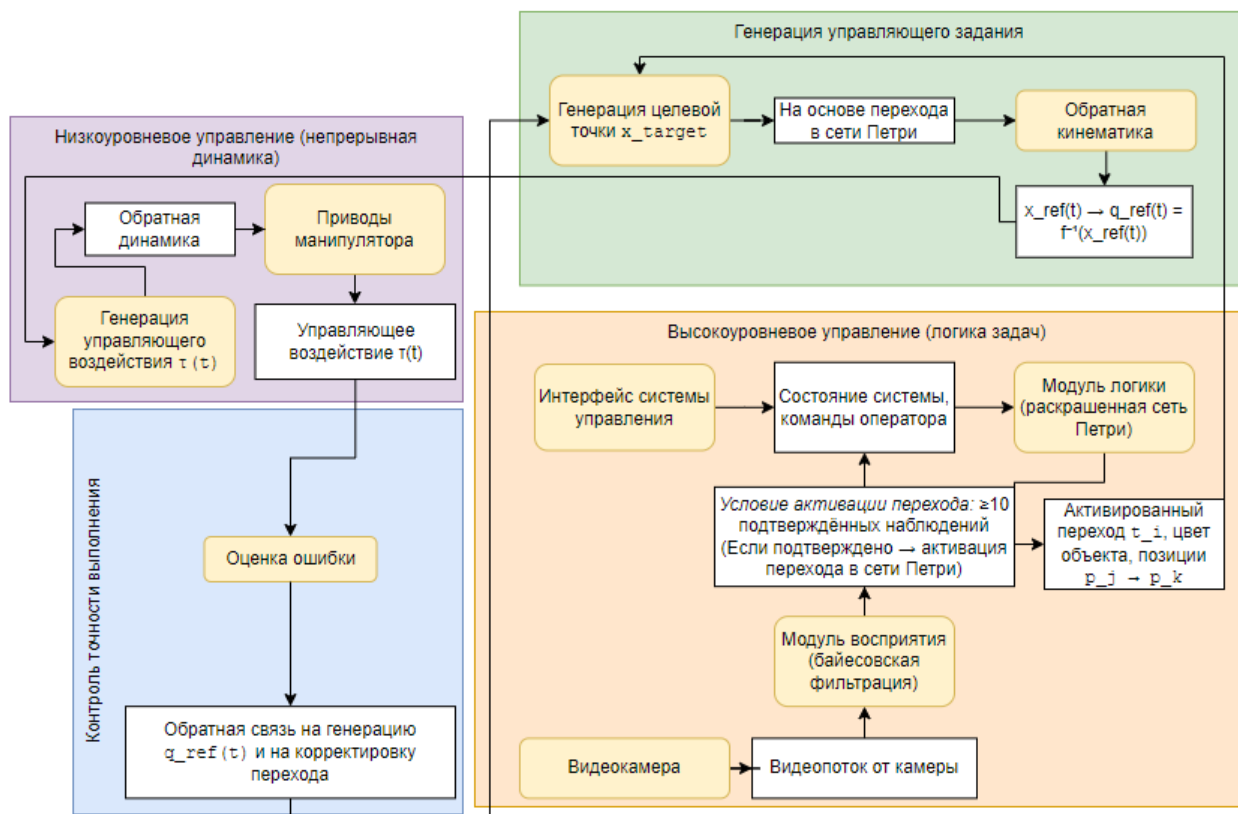


Рис. 2. Схема системы управления

Активация переходов разрешается только при высокой достоверности наблюдений, что предотвращает ложные действия. Общий алгоритм представляет такую логику работы: получение изображения, вероятностное обновление

маркировки сети Петри, выбор перехода, расчет траектории и подачу управляющих воздействий с последующим подтверждением результата.

Эффективность оценивается функционалом качества

$$J = \int_0^T [\|x - x_{target}\|^2 + \alpha \|\dot{q}\|^2 + \beta \|\tau\|^2] dt + \gamma \sum \delta(p(o_j, T), g_j),$$

учитывающим точность позиционирования, плавность движения, энергозатраты и корректность размещения объектов. Задача управления формулируется как минимизация  $J$  по стратегии сети Петри и управлению  $\tau(t)$  при динамических и логических ограничениях, что обеспечивает адаптивную и устойчивую работу комплекса в условиях неопределенности.

**Реализация и экспериментальная верификация**

Для проверки предложенной архитектуры разработан программно-аппаратный комплекс, представленный на рис. 3 [5].

Реализация программной структуры выполнена на Python 3 с использованием OpenCV, NumPy и SciPy. Для работы с цветной сетью Петри создан специализированный модуль [10]. Система включает уровни:

1. Захват изображения;
2. Байесовская фильтрация по матрице зашумления (табл. 2 – условные вероятности  $p(z_i | x_i)$ );
3. Активация переходов сети Петри при достижении порога достоверности;
4. Расчет управления по динамической модели;
5. Обратную связь и обновление маркировки.

Сеть Петри реализует позиции  $p_1 \dots p_4$  (исходные),  $p_5 \dots p_8$  (целевые),  $p_9$  (свободный манипулятор) и переходы  $t_1 \dots t_{16}$ , ассоциированные с подпрограммами перемещения. Цветные дуги разрешают перенос только соответствующих объектов, блокирующие – предотвращают конфликтные действия. Поведение системы моделируется как стохастический автомат с вероятностным восприятием.

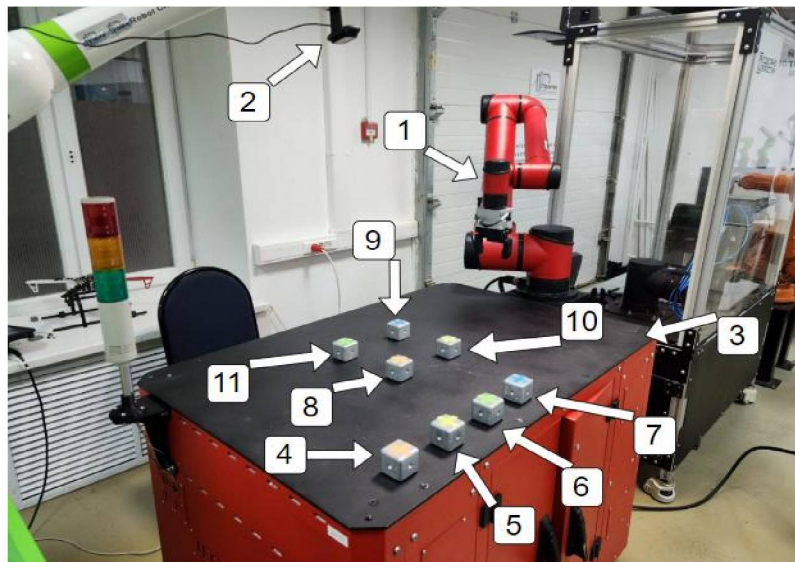


Рис. 3. Программно-аппаратный комплекс:

1 – манипулятор со схватом; 2 – видеочамера; 3 – рабочее пространство; 4 – расположение кубика для позиции p1; 5 – расположение кубика для позиции p2; 6 – расположение кубика для позиции p3; 7 – расположение кубика для позиции p4; 8 – расположение кубика для позиции p5; 9 – расположение кубика для позиции p6; 10 – расположение кубика для позиции p7; 11 – расположение кубика для позиции p8

Численная верификация проводилась в средах Gazebo и MATLAB с учетом случайной начальной конфигурации, шумов наблюдения

и физических ограничений манипулятора [1]. Интегрирование уравнений движения выполнялось методом Рунге – Кутты 4-го порядка

с шагом 0,01 с, траектория и управляющее воздействие рассчитывались в реальном времени [11, 12].

Анализ отклонения от целевой траектории (рис. 4) показал, что максимальная ошибка не

превышает 12 % амплитуды движения, а подавление высокочастотных шумов ограничено уровнем до 3 %. Наибольшие отклонения возникают при смене направления, однако система сохраняет устойчивость.



Рис. 4. График отклонения от целевой траектории

График управляющих воздействий (рис. 5) демонстрирует плавное изменение моментов без перерегулирования, энергозатраты на цикл операций снижены на 15–20 % по сравнению с традиционными алгоритмами.

Минимизация функционала качества (рис. 6,

график  $J$ ) носит монотонный характер, расхождение с расчетной моделью не превышает 7 %.

Динамика апостериорных вероятностей (рис. 7) подтверждает устойчивую идентификацию объектов за 5–8 итераций и невосприимчивость к кратковременным помехам.

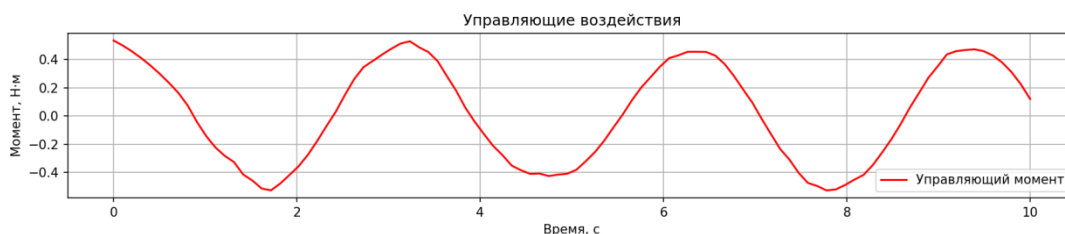


Рис. 5. График управляющего воздействия

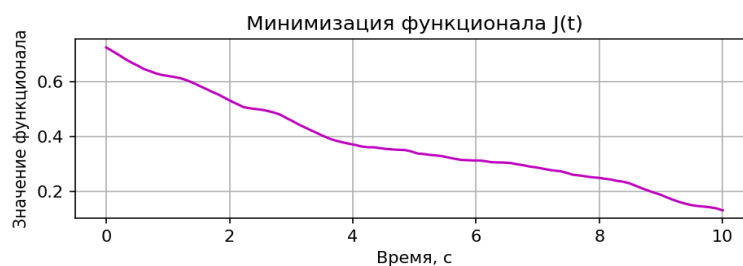


Рис. 6. График минимизации функционала

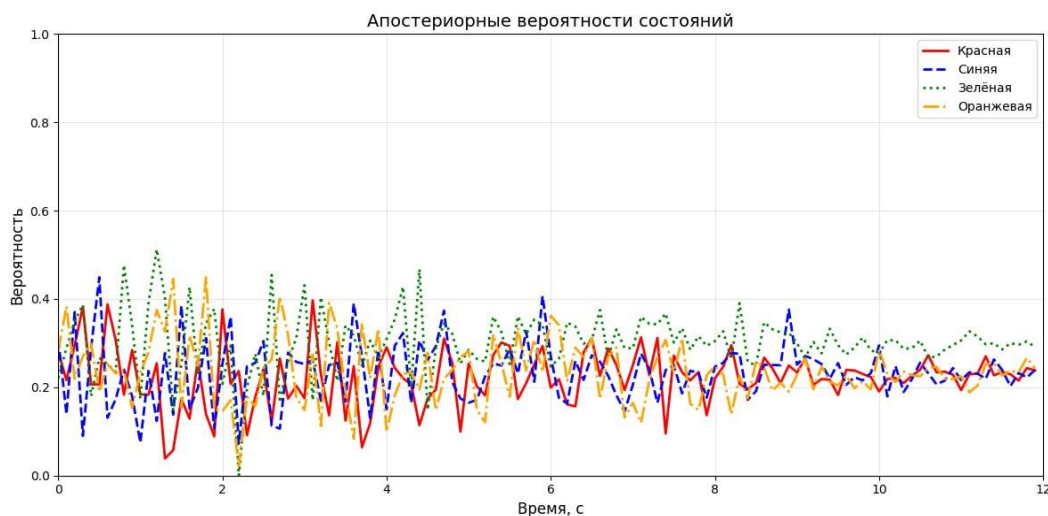


Рис. 7. График апостериорных вероятностей состояний

Эксперименты проводились как в симуляции (100 запусков), так и на реальном комплексе (20 запусков). Итоговые показатели приведены в табл. 3.

се (20 запусков). Итоговые показатели приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Оценка метрик при моделировании работы РТК

Метрика	Среднее значение
Точность распознавания объектов	92,5 %
Доля успешно достигнутых целевых позиций	96,3 %
Среднее время выполнения задачи	14,8 с
Кол-во ложных активаций переходов	0 (благодаря фильтрации)

Полученные результаты подтверждают корректность интеграции сети Петри, вероятностной фильтрации и динамического управления, устойчивость к сенсорным шумам и применимость подхода для задач реального времени при изменяемой конфигурации среды.

## Заключение

Предложен подход к управлению робототехническим комплексом в условиях неопределенности на основе сетей Петри с токенами различного типа и байесовской обработки сенсорных данных. Архитектура объединяет формальную дискретную модель с вероятностной оценкой состояния и динамическим управлением, обеспечивая устойчивую работу манипулятора при неизвестной начальной конфигурации и шумных измерениях.

Результаты моделирования и экспериментов подтвердили эффективность системы для задач адаптивного управления в реальном времени. Подход может служить основой для построения интеллектуальных систем управления робототехническими платформами в частично наблюдаемых и динамически изменяющихся средах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Pei, M.* An Improved Dyna-Q Algorithm for Mobile Robot Path Planning in Unknown Dynamic Environment / M. Pei, H. An, B. Liu, C. Wang // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2022. – Vol. 52. Iss. 7. – Pp. 4415–4425. – DOI: 10.1109/TSMC.2021.3096935.
2. *Han, W.* Non-Gaussian Risk Bounded Trajectory Optimization for Stochastic Nonlinear Systems in Uncertain Environments / W. Han, A. Jasour, B. Williams // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. – 2022. – Pp. 1–8. – DOI: 10.1109/ICRA46639.2022.9811363.
3. Colored resource-oriented Petri nets for deadlock control and reliability design of automated manufacturing systems / A. Al-Shayea et al. // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – Pp. 125616–125627.
4. *Питерсон, Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 264 с.

5. *Девяткин, Ф. В.* Управление робототехническим комплексом в стохастической неопределенной динамической среде с использованием аппарата сетей Петри / Ф. В. Девяткин, Д. И. Арабаджиев, М. А. Шереужев, А. И. Дышечков // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2026. – Т. 28. № 1. – С. 25–38.

6. *Котов, В. Е.* Сети Петри / В. Е. Котов. – М. : Наука, 1984. – 160 с.

7. *Лескин, А. А.* Сети Петри в моделировании и управлении / А. А. Лескин, П. А. Мальцев, А. М. Спиридонов. – Л. : Наука, 1989. – 135 с.

8. Python. Подробный справочник / пер. с англ. – СПб. : Символ-Плюс, 2010. – 864 с.

9. *Го, У.* Супервизорная система для коллаборативной робототехнической ячейки на основе RGBD-камеры / У. Го, В. В. Серебрянный, М. А. Шереужев, С. Шэнь, Л. А. Пак // Автоматизация. Современные технологии. – 2024. – Т. 78. № 8. – С. 350–358.

10. *Шереужев, М. А.* Модификация алгоритма глубокого обучения для распределения функций и задач между робототехническим комплексом и человеком в условиях неопределенности и переменности окружающей среды / М. А. Шереужев, У. Гу, В. В. Серебрянный // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26. № 6. – С. 208–218. – DOI 10.35330/1991-6639-2024-26-6-208-218.

11. *Шереужев, М. А.* Моделирование алгоритма предотвращения столкновений в робототехнических коллаборативных системах / М. А. Шереужев, Д. И. Арабаджиев, И. В. Семянников // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26. № 6. – С. 67–81. – DOI 10.35330/1991-6639-2024-26-6-67-81.

12. *Шереужев, М. А.* Вопросы разработки робототехнической системы для прореживания соцветий / М. А. Шереужев, А. И. Дышечков, И. В. Семянников // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2024. – № 4(71). – С. 17–26.

13. *Халимон, В. И.* Синтез систем логического управления технологическими процессами на основе конечных автоматов и сетей Петри: метод. пособие / В. И. Халимон, А. Ю. Рогов, О. В. Проститенко. – СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2006. – 64 с.

14. *Го, У.* Реализация задачи сборки коллаборативной робототехнической ячейки с применением системы визуального контроля действий человека / У. Го, В. В. Серебрянный, М. А. Шереужев // Экстремальная робототехника. – 2024. – № 1(34). – С. 240–245.

## REFERENCE

1. *Pei, M.* An Improved Dyna-Q Algorithm for Mobile Robot Path Planning in Unknown Dynamic Environment / M. Pei, H. An, B. Liu, C. Wang // IEEE Transactions on Systems,

- Man, and Cybernetics: Systems. – 2022. – Vol. 52. Iss. 7. – Pp. 4415–4425. – DOI: 10.1109/TSMC.2021.3096935.
2. Han, W. Non-Gaussian Risk Bounded Trajectory Optimization for Stochastic Nonlinear Systems in Uncertain Environments / W. Han, A. Jasour, B. Williams // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. – 2022. – Pp. 1–8. – DOI: 10.1109/ICRA46639.2022.9811363.
3. Colored resource-oriented Petri nets for deadlock control and reliability design of automated manufacturing systems / A. Al-Shayea et al. // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – Pp. 125616–125627.
4. Peterson, J. Petri Net Theory and the Modeling of Systems / J. Peterson. – M.: Mir, 1984. – 264 p.
5. Devyatkin, F. V., Control of a robotic complex in a stochastic uncertain dynamic environment using Petri nets / F. V. Devyatkin, D. I. Arabadzhiev, M. A. Shereuzhev, A. I. Dyshekov // Izvestiya of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2026. – Vol. 28. Iss. 1. – Pp. 25–38.
6. Kotov, V. E. Petri Nets / V. E. Kotov. – M.: Nauka, Main Editorial Board for Physical and Mathematical Literature, 1984. – 160 p.
7. Leskin A. A., Petri Nets in Modeling and Control / A. A. Leskin, P. A. Maltsev, A. M. Spiridonov. – L.: Nauka, 1989. – 135 p.
8. Python: Detailed Reference. – St. Petersburg: Simvol-Plus, 2010. – 864 p.
9. Go, U. Supervisory System for a Collaborative Robotic Cell Based on RGBD Camera / U. Go, V. V. Serebrenny, M. A. Shereuzhev, S. Shen, L. A. Pak // Automation. Modern Technologies. – 2024. – Vol. 78. Iss. 8. – Pp. 350–358.
10. Shereuzhev, M. A. Modification of a Deep Learning Algorithm for Distribution of Functions and Tasks between a Robotic Complex and a Human in Uncertain and Dynamic Environments / M. A. Shereuzhev, W. Gu, V. V. Serebrenny // Izvestiya of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2024. – Vol. 26. Iss. 6. – Pp. 208–218. – DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-208-218.
11. Shereuzhev, M. A. Modeling of a Collision Avoidance Algorithm in Collaborative Robotic Systems / M. A. Shereuzhev, D. I. Arabadzhiev, I. V. Semyannikov // Izvestiya of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2024. – Vol. 26. Iss. 6. – Pp. 67–81. – DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-67-81.
12. Shereuzhev, M. A. Issues in Development of a Robotic System for Flower Thinning / M. A. Shereuzhev, A. I. Dyshekov, I. V. Semyannikov // Vestnik of MSTU “STANKIN”. – 2024. – Vol. 4. Iss. 71. – Pp. 17–26.
13. Khalimon, V. I. Synthesis of Logical Control Systems for Technological Processes Based on Finite Automata and Petri Nets: Methodical Guide / V. I. Khalimon, A. Y. Rogov, O. V. Prostitenko. – SPb.: SPbGTI(TU), 2006. – 64 p.
14. Go, U. Implementation of the Task of Assembling a Collaborative Robotic Cell Using a Visual Human Action Control System / U. Go, V. V. Serebrenny, M. A. Shereuzhev // Extreme Robotics. – 2024. – Vol. 1. Iss. 34. – Pp. 240–245.

Статья поступила в редакцию 03.03.2026, доработана 11.03.2026, подписана в печать 16.03.2026  
The article was submitted 03.03.2026, revised 11.03.2026, accepted for publication 16.03.2026

УДК 621.865.8  
DOI 10.35211/1990-5297-2026-4-311-76-85

Научная статья  
Original article

*Д. В. Шилин, П. Е. Ганин, Д. А. Шестов*

## НАГРУЗОЧНЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОЙ СИСТЕМЫ ТРЕХКООРДИНАТНОГО ДООЛЬНОГО РОБОТА

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

✉ Денис Викторович Шилин, shilindv@mpei.ru

**Аннотация.** В лаборатории НИУ МЭИ создана физическая модель трехкоординатной системы позиционирования с манипулятором (аналог FullWood Merlin). Выполнен поверочный расчет приводов с учетом неблагоприятных условий эксплуатации, инерционных нагрузок и потерь на трение для сравнительного анализа характеристик и оценки эффективности оборудования.

**Ключевые слова:** манипулятор, доильный робот, роботизированное доение, электропривод, нагрузочный расчет

**Для цитирования:** Шилин Д. В., Ганин П. Е., Шестов Д. А. Нагрузочный расчет электроприводной системы трехкоординатного доильного робота. Известия ВолгГТУ. 2026; 4(311): 76–85. DOI: 10.35211/1990-5297-2026-4-311-76-85.

### Информация об авторах:

**Денис Викторович Шилин** – доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление и интеллектуальные технологии» НИУ «МЭИ»

<https://orcid.org/0000-0002-5038-7747>

e-mail: shilindv@mpei.ru

**Павел Евгеньевич Ганин** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление и интеллектуальные технологии» НИУ «МЭИ»

<https://orcid.org/0000-0002-4417-6820>

e-mail: ganinpe@mpei.ru

**Дмитрий Александрович Шестов** – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Управление и интеллектуальные технологии» НИУ «МЭИ»

<https://orcid.org/0000-0002-3232-7732>

e-mail: shestovda@mpei.ru

**Вклад авторов:**

**Д. В. Шилин** – определение цели работы, научное руководство, написание текста статьи.

**П. Е. Ганин** – обработка и анализ результатов исследования, визуализация данных.

**Д. А. Шестов** – проверка и интерпретация результатов.

*D. V. Shilin, P. E. Ganin, D. A. Shestov*

**LOAD CALCULATION OF THE ELECTRIC DRIVE  
SYSTEM THREE-AXIS MILKING ROBOT**

**National Research University “MPEI”, Moscow, Russia**

✉ Denis V. Shilin, shilindv@mpei.ru

**Annotation.** A physical model of a three-axis positioning system with a manipulator (similar to the FullWood Merlin) was created at the National Research University MPEI laboratory. A verification calculation of the drives was performed, taking into account adverse operating conditions, inertial loads, and friction losses, to enable a comparative analysis of the characteristics and evaluate the equipment's effectiveness.

**Keywords:** manipulator, milking robot, robotic milking, electric drive, load calculation

**For citation:** Shilin D. V., Ganin P. E., Shestov D. A. Load calculation of the electric drive system three-axis milking robot. *Izvestiya VSTU*. 2026; 4(311): 76–85. DOI: 10.3521/1990-5297-2026-4-311-76-85.

**Information about the authors:**

**Denis V. Shilin** – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Management and Intelligent Technologies, NRU “MPEI”

<https://orcid.org/0000-0002-5038-7747>

e-mail: shilindv@mpei.ru

**Pavel E. Ganin** – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of Management and Intelligent Technologies, NRU “MPEI”

<https://orcid.org/0000-0002-4417-6820>

e-mail: ganinpe@mpei.ru

**Dmitry A. Shestov** – Cand. Sc. (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Management and Intelligent Technologies, NRU “MPEI”

<https://orcid.org/0000-0002-3232-7732>

e-mail: shestovda@mpei.ru

**Contribution of the authors:**

**Denis V. Shilin** – defining the study's objectives, providing scientific supervision, and writing the manuscript.

**Pavel E. Ganin** – processing and analyzing the research results, data visualization.

**Dmitry A. Shestov** – reviewing and interpreting the results.

**Введение**

Доение коров – не только функционально наиболее ответственный процесс в общей технологии производства молока, влияющий на продолжительность использования коров, их продуктивность и качество получаемого молока, но и один из наиболее трудоемких, на выполнение которого затрачивается до 37 % рабочего времени, связанного с обслуживанием животных [1]. Основными задачами на молочной ферме являются: повышение продуктивности животных и снижение их заболеваемости для повышения экономического эффекта. Для достижения поставленной задачи необходимо обеспечить автоматизацию технологических процессов на молочной ферме и контролировать большое количество параметров на разных участках процесса производства молока [2].

Одним из наиболее перспективных направлений в развитии автоматизации сельского хо-

зяйства является построение систем автоматического доения – доильных роботов [3]. Разработки автоматизированных систем доения начались в конце 1970-х гг. такими производителями как Lely (Нидерланды), Gascoigne-Melotte (США), Insentec (Нидерланды) и др. Первой компанией, начавшей промышленное производство доильных роботов, была голландская фирма Lely. На декабрь 2002 г. в мире насчитывалось 1754 доильных робота, через 10 лет их число возросло до 15 000, а далее наблюдается экспоненциальный рост внедрения, и к 2020 г. во всем мире уже функционировало около 60 000 доильных роботов [4].

Каждый доильный робот в своем составе имеет манипулятор, на рабочем органе которого размещается необходимое технологическое оборудование, предназначенное для эффективного проведения роботизированного доения. Молочное животноводство одна из немногих



нагрузочного расчета электроприводной системы трехкоординатного доильного робота.

В таблице 1 представлены исходные характеристики приводной системы.

Также, в качестве исходных данных принимаются: время разгона механизма передвижения  $t_k=1$  с, время разгона механизма поворота

$t_{пов}=1$  с; собственная частота натянутого приводного ремня механизма подъема  $f_{р.п}=105$  Гц; собственная частота натянутого приводного ремня механизма передвижения  $f_{р.к}=86$  Гц; ширина ремня  $B=40$  мм; плотность материала ремня  $\rho=7$  т/м<sup>3</sup>.

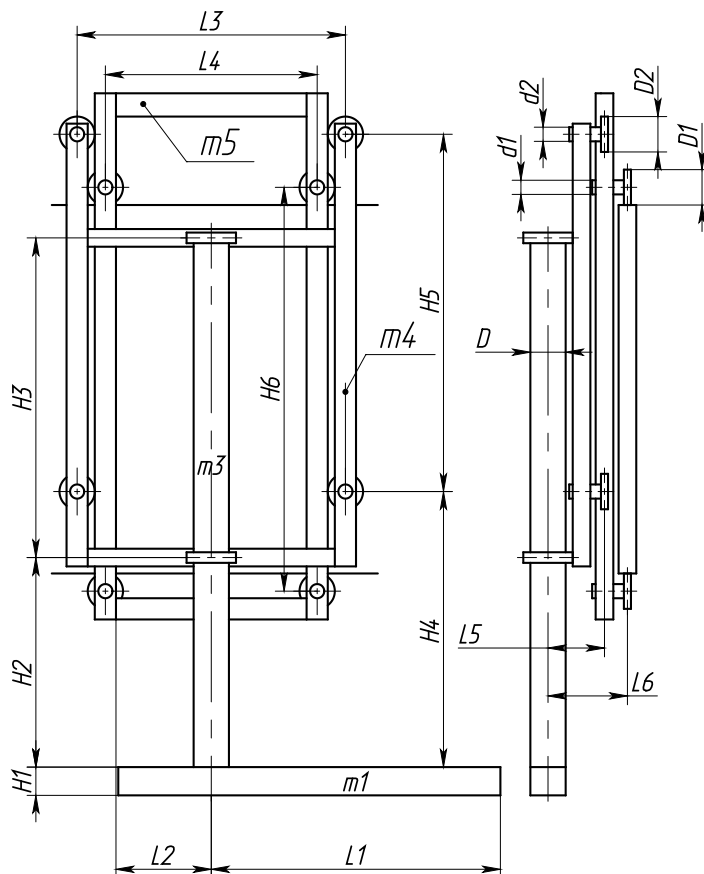


Рис. 2. Расчетная схема приводной системы:

$D = 70$  мм;  $D_1 = 85$  мм;  $D_2 = 85$  мм;  $d_1 = 16$  мм;  $d_2 = 16$  мм;  $L_1 = 1000$  мм;  $L_2 = 300$  мм;  $L_3 = 405$  мм;  $L_4 = 320$  мм;  $L_5 = 115$  мм;  $L_6 = 210$  мм;  $H_1 = 200$  мм;  $H_2 = 500$  мм;  $H_3 = 360$  мм;  $H_4 = 750$  мм;  $H_5 = 400$  мм;  $H_6 = 530$  мм;  $m_1 = 70$  кг;  $m_3 = 42$  кг;  $m_4 = 9$  кг;  $m_5 = 68$  кг

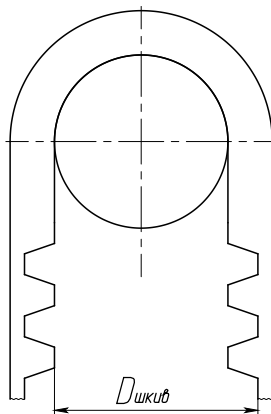


Рис. 3. Расчетная схема ременной передачи:  
диаметр шкива механизма подъема  $D_{ш.п} = 40$  мм;  
диаметр шкива механизма передвижения  $D_{ш.к} = 40$  мм

В таблице 1 представлены наименование электроприводов оригинальной и лабораторной установок.

Таблица 1

Наименование электроприводов оригинальной и лабораторной установок

	FullWood Merlin	Лабораторный стенд
Горизонтальная ось	Festo EMME-AS-80-S-LS-AM	Nidec MZ751N2LA17
Вертикальная ось	Festo EMME-AS-100-S-HS-AMB	Nidec MM152A2LA18
Поворотная ось	Festo EMME-AS-100-S-HS-AM	Nidec MM152N2LA17

### Расчет номинальных скоростей и моментов двигателей

Номинальная скорость механизма вертикальной оси (подъема/опускания манипулятора)  $V_n$  и горизонтальной оси (передвижения)  $V_k$  определяется по формуле [10]:

$$V_{(п,к)} = \frac{n\pi D_{(вл.п.;вл.к)}}{60i},$$

где  $n$  – номинальная скорость двигателя;  $i$  – передаточное число.

Номинальная скорость механизма поворотной оси (поворот манипулятора) определяется по формуле:

$$V_{пов} = \frac{n}{60i}.$$

В таблице 2 представлены результаты расчета номинальных скоростей механизмов с учетом передач.

Таблица 2

Номинальные скорости механизмов

Параметр	Ось					
	Горизонтальная		Вертикальная		Поворотная	
	Festo	Nidec	Festo	Nidec	Festo	Nidec
$n$ , об/мин	3000	3000	3000	2000	3000	2000
$D$ , м	0,04	0,04	0,04	0,04	–	–
$i$	5	5	12	15	100	100
$V_{(п,к)}$ , м/с	1,256	1,256	0,52	0,28	–	–
$V_{пов}$ , об/с	–	–	–	–	0,5	0,33

Расчет мощности на валу двигателя определяется по формуле [11]:

$$P_{рас} = \frac{FV_n}{\eta_{мех}},$$

где  $F$  – сила сопротивления или тяговое усилие;  $\eta_{мех}$  – КПД механизма (коэффициент полезного действия, учитывающий потери в передаточных устройствах, подшипниках и других элементах системы).

Тогда, расчетная мощность на валу двигателя механизма вертикальной оси:

$$P_{р.п} = \frac{(g \sum m_i + \sum F_{тр}) \cdot V_n}{\eta}, \quad (1)$$

где  $F = g \sum m_i + \sum F_{тр}$  – включает в себя силу тяжести поднимаемого груза  $g \sum m_i$  и сумму сил трения в подшипниках и ребордах колес  $\sum F_{тр}$ ;  $\eta$  – КПД механизма.

Расчетная мощность на валу двигателя механизма горизонтальной оси определяется по формуле:

$$P_{р.к} = \frac{V_k \cdot \left( \sum \frac{m_i V_k}{t_k} + g \sum m_i \Psi + \sum F_{тр} \right)}{\eta},$$

где  $\sum \frac{m_i V_k}{t_k}$  – сумма инерционных сил, вы-

званных ускорением/замедлением масс  $m_i$ ,  $g \sum m_i \Psi$  – сумма статических сил тяжести, действующих на звенья;  $\Psi$  – коэффициент трения качения шариков в подшипнике.

Расчетная мощность на валу двигателя механизма поворота определяется по формуле:

$$P_{р.пов} = \frac{V_{пов} \pi L_1 \cdot \left[ \pi L_1 m_1 \frac{V_{пов}}{t_{пов}} + \sum F_{тр} \right]}{\eta},$$

где  $\pi L_1 m_1 \frac{V_{пов}}{t_{пов}}$  – динамическая составляющая нагрузки, связанная с преодолением инерции вращающейся массы.

### Расчет сил сопротивления (трения)

Результирующий момент относительно опорной точки, расположенной на механизме

$$F_{тр.кол} = \frac{2g(2,5\mu + \Psi) \cdot \left[ m_1 \left( \frac{L_1}{2} - L_5 \right) - m_3 L_5 \right] \cdot \left( \frac{L_1}{2} - L_5 \right)}{H_5}.$$

Аналогичным образом получаем выражение для силы трения в ребордах и подшипниках ко-

$$F_{тр.кол} = \frac{2g(2,5\mu + \Psi) \cdot \left[ m_1 \left( \frac{L_1}{2} - L_6 \right) - m_3 L_6 - m_5 (L_6 - L_5) \right] \cdot \left( \frac{L_1}{2} - L_6 \right)}{H_6}.$$

Сила трения в подшипниках оси (механизм поворота) определяется по формуле:

$$F_{тр.ш.о} = \frac{gD \left[ (m_1 + m_3) \mu_{оп} + \frac{L_1 m_1 \mu_o}{2H_6} \right]}{L_1},$$

где  $\mu_{оп}$  – коэффициент трения материала опорного подшипника оси по стали,  $\mu_o$  – коэффициент трения материала опор оси по стали.

### Расчет КПД и номинального момента нагрузки

Номинальный расчетный момент нагрузки, приведенный к валу двигателя механизма вертикальной оси, исходя из выражения (1), определяется по формуле:

$$M_{н.р.п.} = \frac{(g \sum m_i + \sum F_{тр}) \cdot D_{вл.п.}}{2i\eta}.$$

подъема, определяется по формуле:

$$M_{рез} = M_1 - M_3 = m_1 g \left( \frac{L_1}{2} - L_5 \right) - m_3 g L_3. \quad (2)$$

В рамках текущего расчета используется комплексный коэффициент сопротивления  $2,5\mu + \Psi$ , где  $\mu$  – коэффициент трения материала реборд по стали.

В механизме силы действуют с двух сторон, поэтому сила трения в ребордах и подшипниках колес от веса манипулятора и оси (механизм подъема) примет вид [12]:

$$F_{тр.кол} = 2g(2,5\mu + \Psi) \cdot M_{рез}. \quad (3)$$

С учетом (2), а также поправки на плечо действия силы  $\frac{L_1}{2} - L_5$  и нормирования результата выражение (3) примет вид:

лес от веса манипулятора и рамы оси (механизм передвижения):

Номинальные расчетные моменты нагрузки механизмов горизонтальной и поворотной осей, приведенные к валу двигателя определяются по формуле [13]:

$$M_{н.р.} = \frac{9,56P_p}{n}.$$

Условие работоспособности привода при заданной скорости и времени разгона (торможения) – превышение номинального момента двигателя над номинальным расчетным моментом нагрузки, приведенным к валу двигателя, т. е. [13]:

$$\frac{M_{н.д.}}{M_{н.р.}} \geq 1.$$

По результатам проведенных расчетов составлена табл. 3, описывающая нагрузочные характеристики приводной системы при номинальных скоростях работы.

Таблица 3

## Сравнительные характеристики приводов при номинальных скоростях

Параметр	Ось						Ед. изм.
	Горизонтальная		Вертикальная		Поворотная		
	Festo	Nidec	Festo	Nidec	Festo	Nidec	
$\eta_{ш}$	0,99						
$\eta_{ред}$	0,98	0,94	0,96	0,94	0,95	0,94	–
$\eta$	0,98	0,94	0,94	0,92	0,95	0,94	–
$\mu$	0,2						–
$\mu_{оп}$	–	–	–	–	0,1		–
$\mu_o$	–	–	–	–	0,18		–
$\Psi$	0,015						–
$F_{тр}$	28		216		16		Н
$\sum F_{тр}$	37		218		16		Н
$P_p$	387	403	777	428	236	116	Вт
$M_{н.р.}$	1,23	1,28	2,48	2,05	0,75	0,55	Н·м
$M_{н.д.}$	2,4	2,39	4,8	7,16	4,8	7,16	Н·м
$\frac{M_{н.д.}}{M_{н.р.}}$	1,95	1,88	1,93	3,49	6,4	13	–

В таблице 4 представлено сравнение нагрузочных характеристик приводной системы при установленных скоростях работы (соответствующие нормальному рабочему режиму оригинала).

Таблица 4

## Сравнительные характеристики приводов при установленных скоростях

Параметр	Ось						Ед. изм.
	Горизонтальная		Вертикальная		Поворотная		
	Festo	Nidec	Festo	Nidec	Festo	Nidec	
$n$	500	500	1000	1240	500	500	об/мин
$V$	0,21		0,173		0,083		м/с; об/мин
$P_p$	22,5	23,4	254	260	13,9	14,1	Вт
$M_{н.р.}$	0,43	0,45	2,48	2,05	0,27	0,27	Н·м
$M_{н.д.}$	2,4	2,39	4,8	7,16	4,8	7,16	Н·м
$\frac{M_{н.д.}}{M_{н.р.}}$	5,6	5,3	2,0	3,6	17,8	26,5	–

Неодинаковость расчетных моментов и мощностей двигателей механизмов передвижения и поворота при различных скоростях обусловлена неизменяемым (по начальным условиям) временем разгона, что приводит к различию динамических составляющих нагрузок со-

ответствующих механизмов. Оценка эффективности аналогичного привода определяется изменением (увеличением или уменьшением, в приемлемых размерах) кратности номинального момента двигателя по отношению к номинальному расчетному моменту нагрузки, приведенному к валу двигателя [10]:

$$\theta_k = \left[ \frac{\left( \frac{M_{н.д.}}{M_{н.р.}} \right)_{Nidec} - 1}{\left( \frac{M_{н.д.}}{M_{н.р.}} \right)_{Festo}} \right] \cdot 100\%.$$

Кратности номинальных моментов аналогичного и оригинального двигателей по отношению к номинальному расчетному моменту нагрузки, приведенному к валу двигателя в процентах представлены в табл. 5.

Оценка сравнительных характеристик для приводной системы УДР подтверждает пра-

Таблица 5

Кратности номинальных моментов

Ось	Номинальные скорости, %	Установленные скорости, %
Горизонтальная	-1	-5
Вертикальная	+80	+80
Поворотная	+200	+49

вильность принятых решений при выборе аналогов электродвигателей для осей манипулятора. Аналогичные электродвигатели имеют достаточный запас по мощности и моменту для любых уровней и точности регулирования.

**Экстремальное нагружение манипулятора и проверка тормоза вертикальной оси**

Расчет при «экстремальном нагружении» манипулятора массой 500 кг ( $m_1 = 570$  кг) при установленных скоростях представлен в табл. 6.

Таблица 6

Сравнительные характеристики приводов при установленных скоростях

Параметр	Ось						Ед. изм.
	Горизонтальная		Вертикальная		Поворотная		
	Festo	Nidec	Festo	Nidec	Festo	Nidec	
$n$	500	500	1000	1240	500	500	об/мин
$F_{п.н.}$	9		2		-	-	Н
$F_{тр}$	829		2086		109		Н
$\sum F_{тр}$	838		2088		109		Н
$P_p$	230	240	1509	1541	22,5	22,6	Вт
$M_{н.р.}$	4,4	4,6	14,5	11,85	0,43	0,43	Н·м
$M_{н.д.}$	2,4	2,39	4,8	7,16	4,8	7,16	Н·м
$\frac{M_{н.д.}}{M_{н.р.}}$	0,55	0,52	0,33	0,6	11,1	16,65	-

По полученным данным можно сделать вывод, что при экстремальном нагружении манипулятора может быть обеспечена только работа поворотной оси. Работа горизонтальной и вертикальной осей невозможна.

Проверка тормоза механизма вертикальной оси осуществляется по формуле [14]:

$$\frac{M_{т.ном.}}{K_{з.т.} \cdot M_{рт}} \geq 1,$$

где  $K_{з.т.}$  – коэффициент запаса,  $M_{т.ном.}$  – номинальный момент тормоза.

Расчетный момент тормоза механизма вертикальной оси определяется по формуле [14]:

$$M_{рт} = \left( g \sum m_i - \frac{\sum F_{тр}}{1,5} \right) \cdot \frac{\eta D_{вл.п.}}{2i}.$$

Из проведенных расчетов, представленных в табл. 7, можно сделать вывод, что тормоз привода вертикальной оси имеет значительный запас и может обеспечивать нормальную работу в номинальном режиме.

Сравнение тормозных моментов

Параметр	Вертикальная ось		Ед. изм.
	Festo	Nidec	
$M_{т.ном.}$	7,2	10,7	Н·м
$M_{рт.экс}$	7,12	5,76	Н·м
$M_{рт.ном}$	1,75	0,25	Н·м
$K_{з.т.}$	1,5		–
$K_{з.т.} M_{рт.экс}$	10,7	8,6	Н·м
$K_{з.т.} M_{рт.ном}$	2,62	0,38	Н·м
$\frac{M_{т.ном.}}{K_{з.т.} M_{рт.экс}}$	0,67	1,24	–
$\frac{M_{т.ном.}}{K_{з.т.} M_{рт.ном}}$	2,75	28,37	–

Также очевидно, что механизмы манипулятора не предназначены для нормальной работы при «экстремальном» нагружении.

#### Выводы

1. В рамках исследования подтверждена достоверность подобранных аналогов приводной системы манипулятора доильного робота, обеспечивающих аналогичное динамическое поведение (запас по скорости и моменту). Определен запас по моменту для оригинальной и аналогичной приводной системы, определены параметры работы тормоза вертикальной оси и запас при номинальном режиме работы, а также представлены результаты, демонстрирующие поведение системы при экстремальном нагружении.

2. Разработанная физическая модель системы позиционирования доильного робота позволит проводить:

- экспериментальную апробацию технических и алгоритмических решений и методов калибровки выходного звена роботизированной установки с применением технологии компьютерного зрения;
- исследование алгоритмов управления положением рабочего органа доильного робота с сенсорной системой машинного зрения и методов децентрализованного управления приводами звеньев доильного робота;
- комплексное моделирование работы доильного робота с сенсорной системой машинного зрения и исследование характеристик их совместного функционирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Науменко, А. А. Роботизированные системы в животноводстве: учебное пособие / А. А. Науменко, А. А. Чигрин, А. П. Палий, С. В. Кульбаба, И. Г. Бойко, Е. З. Петруша, С. А. Нагорный, А. П. Палий, В. В. Семенов. – Харьков: ХНТУСХ им. П. Василенка, 2015. – 171 с.
2. Цой, Ю. А. Техничко-технологические аспекты увеличения производства молока и повышения его конкурентоспособности в России / Ю. А. Цой, Р. А. Баишева, А. И. Фокин // Труды III международной научно-практической конференции «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы». – 2019. – С. 373–379.
3. Жирков, Е. В. Эффективность применения роботизированных установок при получении высококачественного молока / Е. В. Жирков, О. С. Чеченихина // Научные высказывания. – 2022. – № 14(22). – С. 12–16.
4. Андрейчук, О. А. Роботизированная технология доения в России и за рубежом // Научный журнал молодых ученых. – 2019. – № 4 (17). – С. 44–48.
5. Цой, Ю. А. Тенденции развития роботизированного доения / Ю. А. Цой, Р. А. Баишева // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2019. – № 3(35). – С. 73–78.
6. Шевченко, А. В. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника / А. В. Шевченко, Р. В. Мещеряков, А. Н. Мигачев // Проблемы управления. – 2019. – № 5. – С. 3–18.
7. Доровских, В. И. Исследование качественных показателей использования доильных роботов / В. И. Доровских, В. С. Жариков // Наука в центральной России. – 2019. – № 6(42). – С. 35–42.
8. Кирсанов, В. В. Тенденции развития биотехнических систем в животноводстве / В. В. Кирсанов, Ю. А. Цой // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2020. – Т. 14. № 3. – С. 27–32.
9. Shilin, D. Development of scanning systems and a three-coordinate manipulator for the installation of a milking

robot / D. Shilin, P. Ganin, M. Sheikin, D. Shestov // BIO Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2023. – Vol. 71. – P. 01061.

10. *Марченко, Н. М.* Электрический привод: учебное пособие для вузов / Н. М. Марченко. – Владивосток : Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2021. – 88 с.

11. *Драчев, Г. И.* Теория электропривода: учебное пособие к курсовому проектированию / Г. И. Драчев, А. Н. Шишков, А. Е. Бычков, О. Г. Брылина. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 127 с.

12. *Ешуткин, Д. Н.* Теоретическая механика. Часть I. Статика / Д. Н. Ешуткин, А. В. Коробко, Е. Н. Грядунова. – Орел : ОрелГТУ, 2010. – 82 с.

13. *Остретсов, В. Н.* Электропривод и электрооборудование: учебник для вузов / В. Н. Остретсов, А. В. Палицын. – М. : Юрайт, 2026. – 180 с.

14. *Драчев, Г. И.* Теория электропривода. Ч. 2 : учеб. пособие / Г. И. Драчев. – Челябинск : Издательство ЮУрГУ, 2006. – 202 с.

#### REFERENCE

1. *Naumenko, A. A.* Robotic systems in animal husbandry: a tutorial / A. A. Naumenko, A. A. Chigrin, A. P. Paliy, S. V. Kulbaba, I. G. Boyko, E. Z. Petrusha, S. A. Nagorny, A. P. Paliy, V. V. Semenov. – Kharkov : Kharkiv National University of Agricultural Sciences named after Petra Vasilenko, 2015. – 171 p.

2. *Tsoi, Yu. A.* Technical and technological aspects of increasing milk production and enhancing its competitiveness in Russia / Yu. A. Tsoi, R. A. Baisheva, A. I. Fokin // Proceedings of the III international scientific and practical conference “Agrarian Science of the XXI Century. Current Research and Prospects”. – 2019. – Pp. 373–379.

3. *Zhirkov, E. V.* Efficiency of using robotic installations in obtaining high-quality milk / E. V. Zhirkov, O. S. Chenchikhina // Scientific statements. – 2022. – Vol. 14. Iss. 22. – Pp. 12–16.

4. *Andreychuk, O. A.* Robotic milking technology in Russia and abroad // Scientific journal of young scientists. – 2019. – Vol. 4. Iss. 17. – Pp. 44–48.

5. *Tsoi, Yu. A.* Trends in the development of robotic milking / Yu. A. Tsoi, R. A. Baisheva // Bulletin of the All-Russian Research Institute of Livestock Mechanization. – 2019. – Vol. 3. Iss. 35. – Pp. 73–78.

6. *Shevchenko, A. V.* Review of the global agricultural robotics market. Part 1. Unmanned agricultural machinery / A. V. Shevchenko, R. V. Meshcheryakov, A. N. Migachev // Management issues. – 2019. – Vol. 5. – Pp. 3–18.

7. *Dorovskikh, V. I.* Study of qualitative indicators of the use of milking robots / V. I. Dorovskikh, V. S. Zharikov // Science in central Russia. – 2019. – Vol. 6. Iss. 42. – Pp. 35–42.

8. *Kirsanov, V. V.* Trends in the development of biotechnical systems in animal husbandry / V. V. Kirsanov, Yu. A. Tsoi // Agricultural machinery and technologies. – 2020. – Vol. 14. Iss. 3. – Pp. 27–32.

9. *Shilin, D.* Development of scanning systems and a three-coordinate manipulator for the installation of a milking robot / D. Shilin, P. Ganin, M. Sheikin, D. Shestov // BIO Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Vol. 71. – P. 01061.

10. *Marchenko, N. M.* Electric drive: a tutorial for universities / N. M. Marchenko. – Vladivostok : Publishing house of Far Eastern Federal University, 2021. – 88 p.

11. *Drachev, G. I.* Electric drive theory: a tutorial for course design / G. I. Drachev, A. N. Shishkov, A. E. Bychkov, O. G. Brylina. – Chelyabinsk : SUSU Publishing Center, 2017. – 127 p.

12. *Eshutkin, D. N.* Theoretical Mechanics. Part I. Statics / D. N. Eshutkin, A. V. Korobko, E. N. Gryadunova. – Orel : OrelSTU, 2010. – 82 p.

13. *Ostretsov, V. N.* Electric Drive and Electrical Equipment: a textbook for universities / V. N. Ostretsov, A. V. Palitsyn. – M. : Yurait Publishing House, 2026. – 180 p.

14. *Drachev, G. I.* Electric Drive Theory. Part 2: Textbook / G. I. Drachev. – Chelyabinsk : SUSU Publishing House, 2006. – 202 p.

Статья поступила в редакцию 15.10.2025, доработана 02.03.2026, подписана в печать 16.03.2026

The article was submitted 15.10.2025, revised 02.03.2026, accepted for publication 16.03.2026

Ответственный за выпуск  
Ирина Петровна **ВЕРШИНИНА**

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

Корректура **Р. А. Жулите**  
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 – 8 (8442) 24-80-00  
**E-mail:** [ianovakov@vstu.ru](mailto:ianovakov@vstu.ru)

---

Темплан 2026 г. Поз. № 7ж. Дата выхода в свет 22.04.2026 г. Формат 60 x 84 1/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,24. Уч.-изд. л. 9,55.  
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 179.

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

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

---

В научном журнале «Известия ВолгГТУ», серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы», публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований в области механики и управления движением робототехнических систем и их мехатронных узлов.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word 2003-2007 и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм). УДК статьи обязательно.

Необходимо отправлять файлы статей на электронный адрес **rm@vstu.ru**.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора формул следует использовать встраиваемый формульный процессор MathType. Формулы в тексте должны быть напечатаны без дополнительных интервалов между строками текста. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Нумерация формул по всей статье должна быть сквозной. Таблицы должны содержать заголовки. В компьютерном варианте иллюстрации следует готовить в векторных форматах. В растровых форматах допускаются только фотографии.

В тексте, формулах и на рисунках латинские буквы следует набирать *курсивом*. Русские и греческие буквы, цифры, стандартные функции (sin, cos, sign, max, const, log, det, exp и т.п.) должны иметь прямое начертание. В основе матриц лежат круглые скобки, в основе определителей – прямые линии.

До основного текста статьи приводятся на русском языке, а затем повторяются на английском языке следующие элементы издательского оформления: инициалы и фамилия автора (авторов), название статьи, организация или предприятие, на котором работает автор статьи (если коллектив авторов включает сотрудников различных учреждений, необходимо указать место работы каждого автора), электронный адрес автора, ответственного за переписку, аннотация к статье и ключевые слова, благодарности, финансирование, библиографическая запись для цитирования, информация об авторах, вклад авторов.

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных

скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются. Библиографический список дублируется на английском языке.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводится на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Рекомендованный объем статьи – **9-10 страниц** бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список.

Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должна быть приложена документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.

ISSN 1990-5297



9 771990 529000 >