

# ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского  
государственного  
технического  
университета

ISSN 1990-5297



Серия  
Роботы, мехатроника  
и робототехнические системы

16+

№ 9 (304)  
2025

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

**Редакционная коллегия:**

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

Серия

«РОБОТЫ,  
МЕХАТРОНИКА  
И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ  
СИСТЕМЫ»

# ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

**Брискин Е. С.**, д.ф.-м.н., проф.

*Горобцов А. С.*, д.т.н., проф.

*Жога В. В.*, д.ф.-м.н., проф.

*Зейдис И.*, PhD, проф.,

Университет Ильменау  
(г. Ильменау, Германия)

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

*Калинин Я. В.*, к.т.н., доцент,  
РУДН (г. Москва)

*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. Благоданова  
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

**№ 9 (304)**  
**Сентябрь**  
**2025**

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*

Head Editor of the scientific journal "Izvestiya VSTU":

**Novakov I. A.** – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, Advisor in the Rector's Office of VSTU

### **Editorial board:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Navrotsky A. V.*, Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Chemistry), Prof. of VSTU

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



SERIES  
"ROBOTS,  
MECHATRONICS  
AND ROBOTIC SYSTEMS"

# IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL  
UNIVERSITY

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

## Editorial board:

Chairman

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

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

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

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

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

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

**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", 2025

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

**№ 9 (304)**  
**September**  
**2025**

**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

- |                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| Артемов К. С. 6      | Ляшенко Д. А. 41       |
| Бабоченко Н. В. 22   | Малолетов А. В. 45     |
| Брискин Е. С. 52     | Нелюбова А. В. 36      |
| Быков А. С. 11, 31   | Несмиянов И. А. 22, 41 |
| Вершинина И. П. 57   | Николаев М. Е. 41      |
| Воробьева Н. С. 22   | Николаева В. В. 36     |
| Горобцов А. С. 16    | Перфилов В. А. 41      |
| Данилевич В. М. 16   | Радченко Т. В. 45      |
| Дементьев Е. В. 57   | Разумов Д. А. 52       |
| Захаров Е. Н. 22     | Рогачёв А. А. 16       |
| Иванов А. Г. 22      | Сафонова Н. К. 16      |
| Карлов В. И. 26      | Смирная Л. Д. 57       |
| Кошман А. М. 11, 31  | Шурыгин В. А. 11, 31   |
| Крыхтин Ю. И. 26     | Щербов Р. М. 16        |
| Леонард А. В. 11, 31 |                        |

## СОДЕРЖАНИЕ

---

|                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Артемьев К. С.</i><br>Влияние мест установки шагающих движителей<br>на силу сопротивления движению мобильного робота.....                                                                                                       | 6  |
| <i>Быков А. С., Кошман А. М., Леонард А. В., Шурыгин В. А.</i><br>Комбинированное моделирование обработки двумерных данных<br>о среде и планирования движения мобильного робота<br>по горизонтальной плоскости.....                | 11 |
| <i>Горобцов А. С., Данилевич В. М., Шербов Р. М., Сафонова Н. К., Рогачёв А. А.</i><br>Расчетный анализ управляемого движения манипулятора<br>с упругими звеньями.....                                                             | 16 |
| <i>Захаров Е. Н., Несмиянов И. А., Воробьева Н. С., Иванов А. Г., Бабоченко Н. В.</i><br>Принцип реализации интеллектуального управления<br>манипулятором-триподом.....                                                            | 22 |
| <i>Карлов В. И., Крыхтин Ю. И.</i><br>К разработке гидравлической системы дистанционного управления<br>силовым агрегатом насосной установки большой мощности для ГРП.....                                                          | 26 |
| <i>Кошман А. М., Быков А. С., Леонард А. В., Шурыгин В. А.</i><br>Планирование движения робота по горизонтальной плоскости<br>с обходом двух статичных препятствий,<br>расположенных на незначительном удалении друг от друга..... | 31 |
| <i>Нелюбова А. В., Николаева В. В.</i><br>Экспериментальное определение статической характеристики<br>линейного привода.....                                                                                                       | 36 |
| <i>Несмиянов И. А., Николаев М. Е., Перфилов В. А., Ляшенко Д. А.</i><br>База знаний циклов технологических погрузочно-разгрузочных<br>операций на примере погрузки штучных грузов.....                                            | 41 |
| <i>Радченко Т. В., Малолетов А. В.</i><br>Разработка VR-приложения для удаленного управления роботом.....                                                                                                                          | 45 |
| <i>Разумов Д. А., Брискин Е. С.</i><br>Об особенностях взаимодействия понтона-заглушки<br>аварийной скважины робототехнической системы<br>с набегающим потоком жидкости как твердого тела.....                                     | 52 |
| <i>Смирная Л. Д., Вершинина И. П., Дементьев Е. В.</i><br>Об управлении поступательным движением твердого тела<br>в поле силы тяготения за счет наложения связей.....                                                              | 57 |
| К сведению авторов.....                                                                                                                                                                                                            | 63 |

*К. С. Артемьев*

**ВЛИЯНИЕ МЕСТ УСТАНОВКИ ШАГАЮЩИХ ДВИЖИТЕЛЕЙ  
НА СИЛУ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

**Волгоградский государственный технический университет**

*ksartemeyv@gmail.com*

Исследуется влияние мест установки шагающих движителей на силу сопротивления движению мобильного робота. Рассматриваются основные параметры размещения движителей, такие как расстояние между опорными точками робота относительно корпуса машины. Анализируются способы минимизации сопротивления через оптимальное расположение движителей, что позволяет повысить энергоэффективность системы. Полученные результаты имеют практическое значение для проектирования мобильных роботов с шагающими движителями.

*Ключевые слова:* мобильный робот, шагающий движитель, сила сопротивления.

*K. S. Artemyev*

**INFLUENCE OF WALKING PROPULSION DEVICE MOUNTING LOCATIONS  
ON THE MOTION RESISTANCE FORCE OF A MOBILE ROBOT**

**Volgograd State Technical University**

The influence of walking thrusters installation locations on the drag force of a mobile robot is investigated. The basic parameters of propulsor placement, such as the distance between the robot's fulcrums relative to the machine body, are considered. Ways of minimising drag through optimal propulsor placement are analysed, thus improving the energy efficiency of the system. The results obtained are of practical importance for the design of mobile robots with walking thrusters.

*Keywords:* mobile robot, a walking propulsor, resistance force.

**Введение**

Мобильные роботы различаются типами движителей и условиями применения. Колесные системы подходят для ровных поверхностей, гусеничные эффективны на мягких грунтах, а шагающие движители обладают уникальными возможностями для передвижения по сложным ландшафтам, включая неровные, вертикальные и деформируемые поверхности [1, 2].

Преимущество шагающих систем – дискретное взаимодействие с поверхностью, обеспечивающее высокую адаптивность и профильную проходимость при преодолении препятствий. Однако эффективность таких роботов во многом зависит от рационального размещения движителей на корпусе. Неадекватная кон-

фигурация может существенно увеличить силу сопротивления движению, что приводит к повышенным энергозатратам и снижению общей производительности системы.

Энергоэффективность шагающих движителей зависит напрямую от множества факторов, включая массу робота, структуру его конструкции, параметры управления и свойства опорной поверхности. Существующие исследования предлагают различные подходы к решению этой проблемы, такие как оптимизация походки, использование внутренних масс для балансировки, разработка новых приводов с минимальными потерями на трение [3–5]. Несмотря на достигнутые результаты, задача повышения энергоэффективности остается актуальной и требует дальнейшего исследования.



При взаимодействии наземных транспортных средств с опорной поверхностью вводится сила сопротивления движению. В случае применения шагающих движителей известно выражение для определения осредненной силы сопротивления движения  $Q_{\text{сопр}}$  [6, 7]. Для количественной оценки силы тяги требуется рассматривать стопы, погружающиеся в грунт на величину, пропорциональную максимальной нормальной нагрузке  $P_{j \max}$ , приходящейся на каждый движитель [7].

$$Q_{\text{сопр}} = \sum_{j=1}^N \frac{P_{j \max}^2}{2c_n l}, \quad (1)$$

где  $c_n$  – нормальная жесткость системы (опорная поверхность – стопа движителя);  $l$  – длина шага робота.

Таким образом, на силу сопротивления движению влияет распределение нормальных реакций, а изменение их величины, ввиду смещения расположения движителя относительно вертикальной оси, необходимо учитывать при проектировании шагающего мобильного робота.

#### Постановка задачи

Расчетная схема шагающей машины предполагает изучение ее плоского движения как твердого тела (рис. 1).

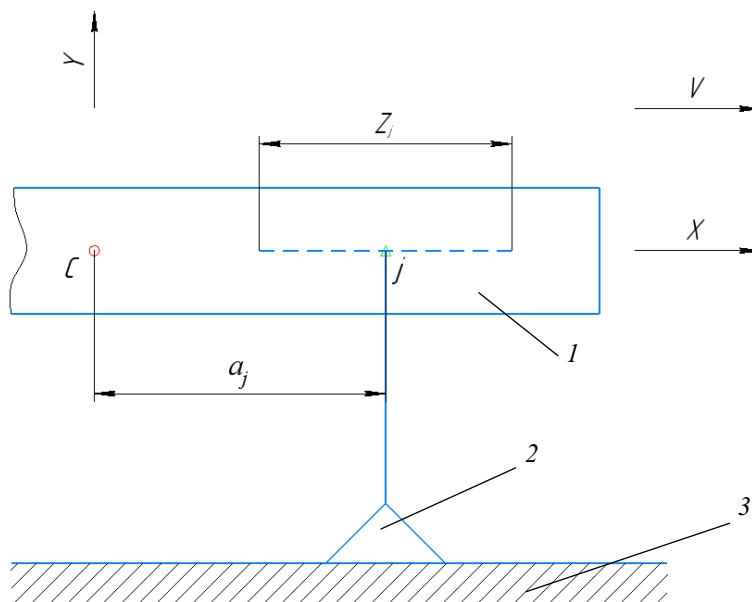


Рис. 1. Расчетная схема шагающей машины:  
1 – корпус робота; 2 – шагающий движитель; 3 – опорная поверхность

При моделировании прямолинейного движения шагающего робота, имеющего  $N$  движителей, весом  $G$  и со скоростью  $V$  положение  $j$  движителя относительно центра масс  $C$  характеризуется координатой  $a_j$ .

Взаимодействие движителя с опорной поверхностью во время цикла движения  $T$  происходит с учетом коэффициента режима  $\gamma$ .

Задавшись параметрами, описывающими движение шагающего робота, становится возможным определить нормальные реакции  $P_j$  как функцию времени  $P_j = P_j(t)$  и их максимальные значения.

#### Метод решения

Рассматривается движение шагающего робота с постоянной горизонтальной скоростью его центра масс. При рассмотрении движения робота как квазистатического становится возможным составить уравнения его движения, дополненные уравнениями совместимости деформаций  $\lambda_j$  системы «опорная поверхность – стопа движителя».

Тогда, усилия взаимодействия  $P_j$ :

$$P_j = c\lambda_j, \quad (2)$$

$$\lambda_j = -y_c - \varphi a_j + (L_0 + \Delta_j).$$

В течение фазы переноса движителя считается, что  $\lambda_j = 0$ .

Уравнения движения шагающего робота с постоянной скоростью центра масс имеют вид:

$$\begin{cases} M\ddot{x}_c = \sum F_x = 0, \\ M\ddot{y}_c = \sum_{j=1}^N P_j - G = 0, \\ J\ddot{\varphi}_c = \sum_{j=1}^N P_j a_j = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $M$  – масса робота;  $F_x$  – проекция внешних сил на ось  $x$ ;  $J$  – момент инерции тела.

При квазистатическом режиме движения  $\ddot{y}_c = 0$ ,  $\ddot{\varphi}_c = 0$ , уравнения (3) принимают форму:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = V = \text{const}, \\ \sum_{j=1}^N P_j = G, \\ \sum_{j=1}^N P_j a_j = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Систему уравнений (4) возможно представить в виде двух линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} y_c^* (N - k) + \varphi \sum_{j=1}^N a_j = \frac{G}{c} - \sum_{j=1}^N \Delta_j, \\ y_c^* \sum_{j=1}^N a_j + \varphi \sum_{j=1}^N a_j^2 = - \sum_{j=1}^N a_j \Delta_j, \end{cases} \quad (5)$$

где  $y_c^* = y_c - L$ .

#### Имитационное моделирование

Рассматривается мобильный шагающий робот с четырьмя движителями  $N = 4$ , установленными на каждом из бортов. Движители на бортах установлены симметрично и имеют одинаковое расписание движения. Рассматривается возможность изменения точки закрепления движителей относительно корпуса мобильного робота  $S_{nj}$  в некотором диапазоне относительно изначального положения  $Z_j$  (рис. 2). Изначальные, принимаемые за базовые, положения движителей приведены в таблице.

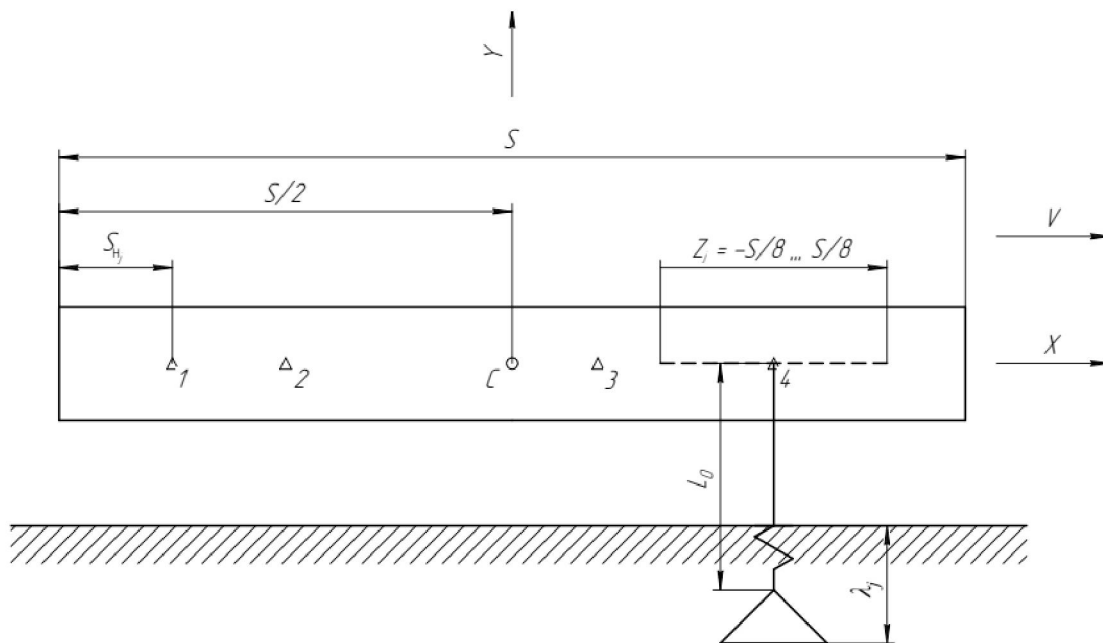


Рис. 2. Расположение точек крепления шагающих движителей относительно корпуса мобильного робота

При моделировании задаются:

1) положение стоп движителей при максимальном их выдвигении  $S_{nj} = a_{j \max}$  (табл. 1);

2) период  $T = 16$  с;

3) вес мобильного робота  $G = 10000$  Н;

4) нормальная жесткость системы «опорная поверхность – опора движителя»

$$c_n = 25000 \text{ Н/м}^2;$$

5) количество двигателей  $N = 4$ ;

6) коэффициент режима  $\gamma = 0,8$ ;

7) длина шага  $l = 1$  м;

8) длина корпуса робота  $S = 8$  м;

9) расписание движения двигателей  $\tau_{nj}$  (см. таблицу).

Расписание движения двигателей

| Номер двигателя | $S_{nj}, \text{м}$ | $\tau_{nj}, \text{с}$ |
|-----------------|--------------------|-----------------------|
| 1               | $-\frac{3S}{8}$    | -5                    |
| 2               | $-\frac{2S}{8}$    | -12                   |
| 3               | $\frac{S}{8}$      | -1                    |
| 4               | $\frac{2S}{8}$     | 3                     |

На рис. 3 приведены графики визуализации походки робота с базовым расположением шагающих двигателей относительно корпуса робота.

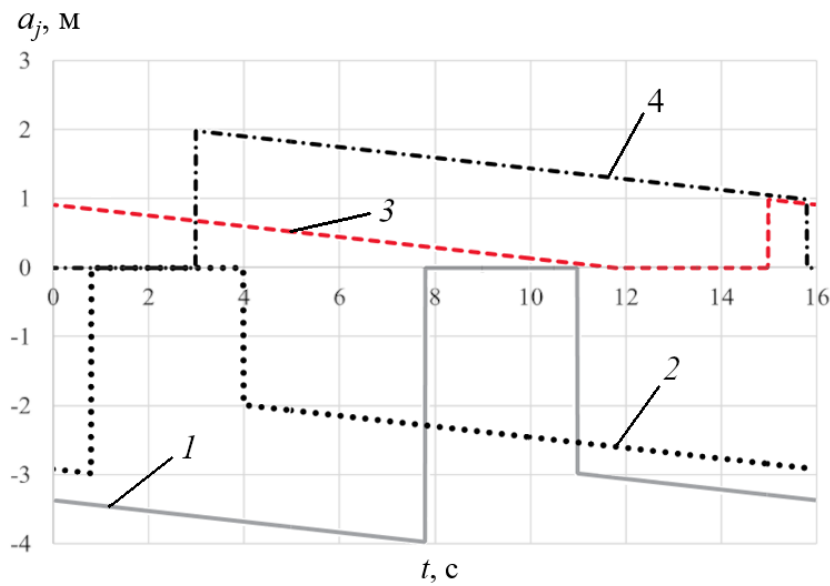


Рис. 3. Расписание движения двигателей:  
1–4 – номера двигателей

При моделировании движения робота с заданной походкой, варьируя лишь длину шага  $l$ ,

получена зависимость силы сопротивления движению от длины шага, показанная на рис. 4.

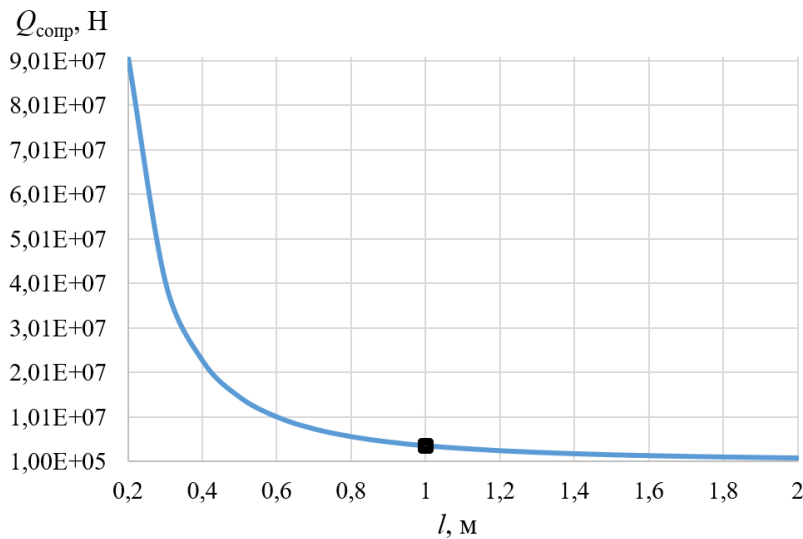


Рис. 4. Зависимость силы сопротивления от длины шага мобильного робота

Изменение точки крепления движителя с последующим моделированием процесса движения шагающего робота приводит к изменению сил сопротивления движению. Положение движителя на корпусе варьировалось в диапазоне  $S_{H_j} - S/8 \leq S_{H_j} \leq S_{H_j} + S/8$ , при изменении

места установки одного движителя точки крепления остальных движителей на корпусе не изменялись и сохранялись в базовом положении (см. таблицу).

Возникающая сила сопротивления движению представлена на рис. 5.

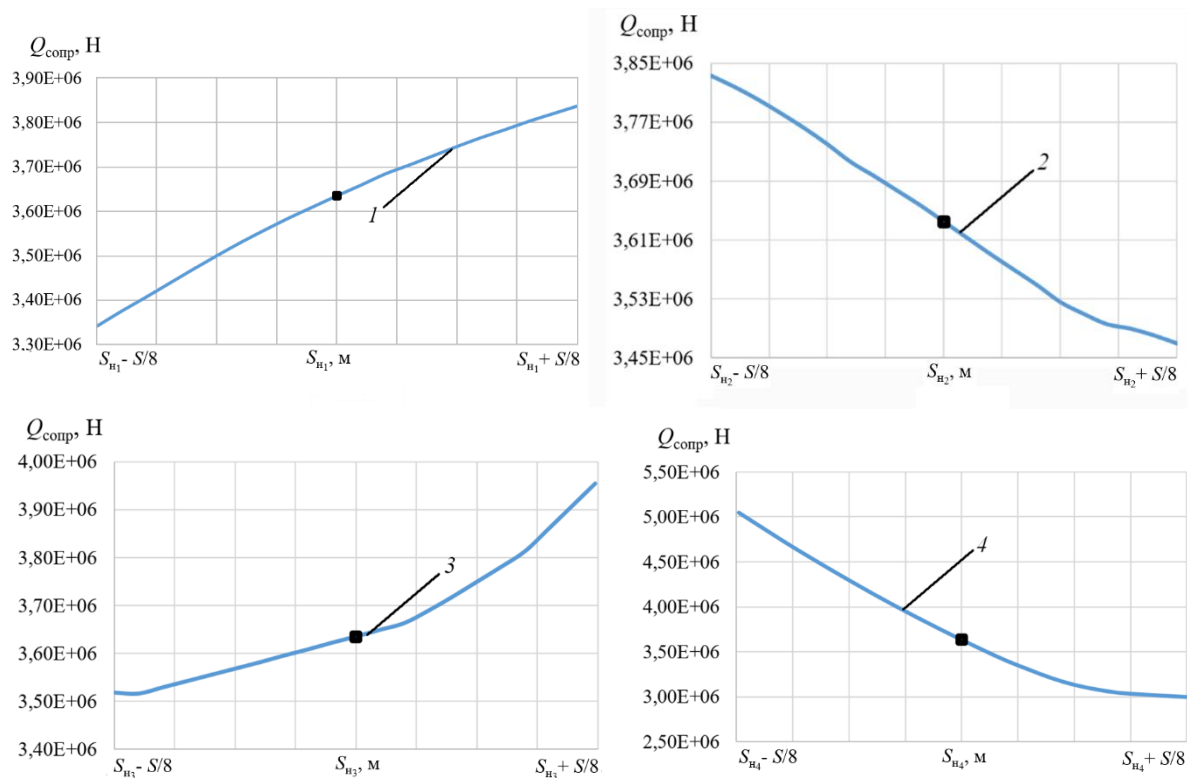


Рис. 5. Изменение силы сопротивления движению при перемещении точки крепления движителя к корпусу:  
1–4 – номера движителей

### Заключение

Установлено влияние конструктивных и управляющих параметров роботов и их механизмов шагания на величину осредненной силы сопротивления движению по шагу.

Увеличение длины шага без изменения скорости движения шагающей машины и без учета работы привода во время фазы переноса приводит к уменьшению осредненной силы сопротивления движению при любом расположении движителей на корпусе шагающей машины.

Расположение крайних движителей на большем удалении от центра масс робота приводит к уменьшению осредненной силы сопротивления движению, при этом увеличение расстояния между первым по счету движителем от геометрического центра корпуса до центра масс приводит к увеличению осредненной силы сопротивления движению.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Охоцимский, Д. Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д. Е. Охоцимский, Ю. Ф. Голубев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 312 с.
2. Лапшин, В. В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата / В. В. Лапшин // Известия Академии наук. Механика твердого тела. – 1993. – № 1. – С. 65–74.
3. Смирная, Л. Д. О точности позиционирования шагающих движителей мобильных роботов / Л. Д. Смирная, И. П. Вершинина // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 9 (256) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2021. – С. 69–73.
4. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 2. Динамика движения шагающих машин серии «Восьминог» / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 19–26.
5. Брискин, Е. С. Об управлении тяговыми характеристиками и сопротивлением движению мобильных роботов с шагающими движителями / Е. С. Брискин, Л. Д. Смирная, К. С. Артемьев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 2. – С. 101–106.

6. Игнатъев, М. Б. Алгоритмы управления роботами-манипуляторами / М. Б. Игнатъев, Ф. М. Кулаков, А. М. Покровский. – М.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1972. – 248 с.

7. Брискин, Е. С. Об общей динамике и повороте шагающих машин / Е. С. Брискин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1997. – № 6. – С. 33–39.

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5  
DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-11-15

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

**КОМБИНИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ  
ДВУМЕРНЫХ ДАННЫХ О СРЕДЕ И ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ  
МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ**

**Волгоградский государственный технический университет**

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

В статье рассматривается вопрос совместного моделирования алгоритмов обработки данных о среде, получаемых от 2D-лидара, и использования этих данных в модифицированном алгоритме планирования движения мобильного робота. Описано поэтапное функционирование комбинированного алгоритма, представлена его общая схема и определены его особенности.

*Ключевые слова:* мобильный робот, планирование движения, обход препятствий, метод потенциальных полей, компьютерное моделирование, техническое зрение

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

**COMBINED SIMULATION OF PROCESSING TWO-DIMENSIONAL  
ENVIRONMENTAL DATA AND PLANNING THE MOVEMENT  
OF A MOBILE ROBOT ALONG A HORIZONTAL PLANE**

**Volgograd State Technical University**

The article discusses the joint modeling of algorithms for the processing of environmental data obtained from a two-dimensional lidar (2D-lidar) and the use of these data in a modified algorithm for the planning of the movement of a mobile robot. It describes the step-by-step operation of the integrated algorithm, presents its general scheme and determines its features.

*Keywords:* mobile robot, motion planning, obstacle avoidance, artificial potential field, computer simulation, computer vision

**Введение**

Современные автономные робототехнические системы требуют эффективного взаимодействия с динамичной средой, что обуславливает необходимость обработки данных от различных сенсоров. Существуют подходы по сканированию окружающей среды мобильного робота на основе применения лидаров [1], видеокамер [2] и ультразвуковых датчиков [3]. Двумерные лидары демонстрируют преимущества в задачах навигации мобильных роботов [4]. Для автоматического синтеза законов движения (траекторий) робота в недетерминированной среде необходимо совместное использование алгоритмов обработки сенсорной информации и алгоритмов планирования движения, обеспечивающих безопасное уклонение робота от препятствий.

**1. Постановка задачи**

Ранее в работах [5, 6] были предложены алгоритмы обработки данных об окружающей среде мобильного робота. Описанные алгоритмы позволяют обрабатывать данные, поступающие от виртуального двумерного лидара: формировать общий массив геометрических точек видимых границ препятствий; разбивать его на массивы точек, характеризующие препятствия; классифицировать препятствия и производить их аппроксимацию (расчет координат  $x_i$ ,  $y_i$  центров габаритных окружностей препятствий и их радиусов  $R_i$ ).

В качестве метода планирования движения центра масс мобильного робота (ЦМ МР) используется способ, основанный на методе  $VC/APF+BC^I$  [7, 8]. Данный метод обеспечивает теоретически безударный обход статических

препятствий, используя отталкивающую силу, которая действует в поле препятствия между внешней  $r_0$  и внутренней  $r_{min}$  его границами.

Требуется интегрировать указанные алгоритмы друг с другом и проверить работоспособность комбинированного алгоритма с помощью численных экспериментов.

## 2. Описание комбинированного алгоритма

В качестве исходных данных задаются: начальные и конечные координаты, скорости ЦМ МР, масса робота, размер его габаритной окружности, оперативное время  $t$ , временной шаг  $\Delta t$  и др. Для упрощения отладки алгоритмов в качестве источника данных вместо реального устройства (двумерного лидара) используется программный инструмент, моделирующий его работу. Данный программный блок позволяет настраивать дальность видимости моделируемого устройства и угловой шаг поворота его излучателя-детектора. Препятствия и окружающая местность робота задаются в виде двумерного изображения с заданным масштабом. Преграды изображаются черным цветом, соответственно признаком обнаружения препятствия является нахождение пикселя черного цвета на луче моделируемого лидара. Функционирование данного модуля описано в статье [5]. В результате ра-

боты программного модуля формируется массив данных, характеризующих обнаруженные точки границ препятствий возле робота.

Массив, полученный на этапе сбора информации об окружающей среде, используется в следующем программном модуле, который отвечает за идентификацию препятствий. На основании сравнения расстояний между точками с пороговым параметром идентификации первоначальный массив разделяется на множество массивов, каждый из которых характеризует отдельное препятствие.

Затем следует этап классификации препятствий [6]. В зависимости от присвоенного класса для каждого из препятствий рассчитываются его параметры. Для алгоритма планирования законов движения робота входными параметрами являются координаты  $(x_1, y_1)$  центра окружности, характеризующей препятствие, и ее радиус  $R_1$ .

Набор параметров для препятствия передается в программный блок, отвечающий за планирование движения мобильного робота. В данной работе, в отличие от работ [7, 8], параметры препятствия изначально неизвестны, на каждом временном шаге они определяются при нахождении препятствия в зоне видимости лидара радиуса  $r_L$  и передаются в модифицированный алгоритм планирования движения мобильного робота.

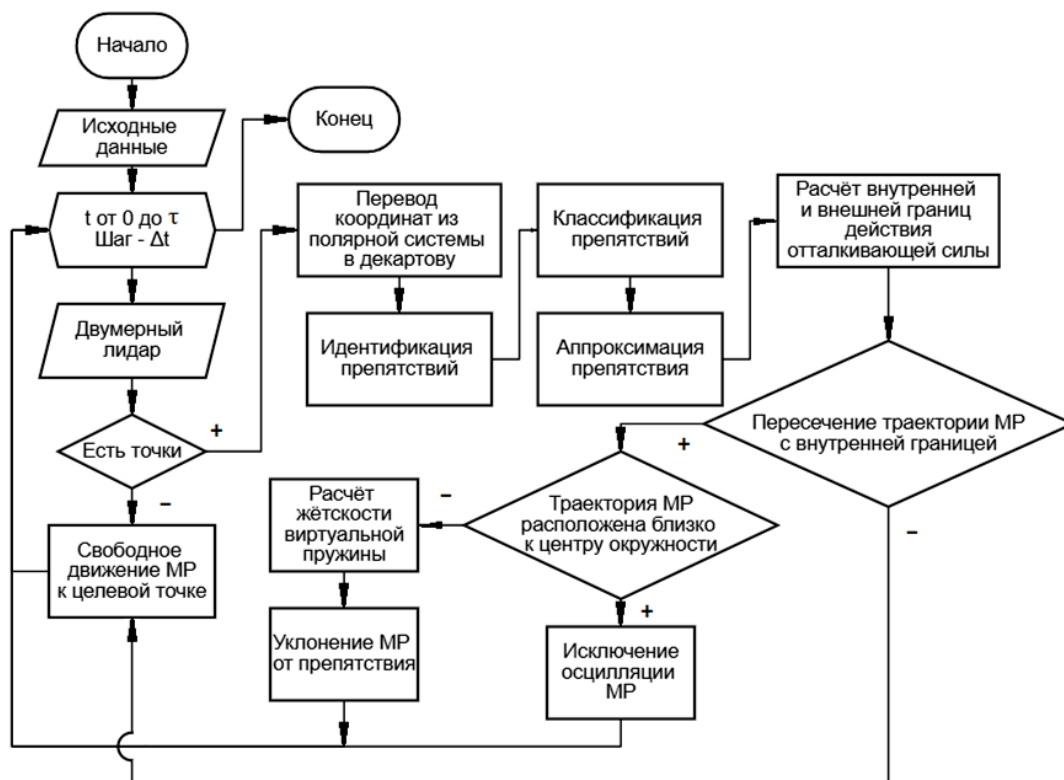


Рис. 1. Блок-схема комбинированного алгоритма

На следующем этапе рассчитываются значения радиуса  $r_{min}$  внутренней границы и радиуса  $r_0$  внешней границы силового поля вокруг препятствия. Проверяется наличие пересечения аналитической траектории (получающейся в результате применения законов движения в интегральной форме) [7] и внутренней границы поля. При установлении пересечения минимальное расстояние между аналитической траекторией и центром описанной вокруг препятствия окружности сравнивается с пороговым значением. Если расстояние меньше, чем пороговое значение, то запускается режим исключения осцилляций мобильного робота [9]. Если расстояние больше либо равно пороговому значению, то запускается режим уклонения от препятствия: происходит определение жесткости виртуальной пружины  $c$  и рассчиты-

ваются координаты (скорости, ускорения) ЦМ МР с учетом влияния отталкивающей силы. В случае если пересечения нет, движение мобильного робота происходит по кратчайшей траектории до целевой точки. Данная процедура повторяется каждый раз, когда робот фиксирует препятствие.

В общем виде блок-схема комбинированного алгоритма представлена на рис. 1.

### 3. Моделирование процесса работы комбинированного алгоритма

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования обхода роботом статичного препятствия в виде квадрата со стороной 1 м за заданное время, где на рис. 2–5: «Start» – начальное положение ЦМ МР, «Goal» – целевое (требуемое) конечное положение ЦМ МР.

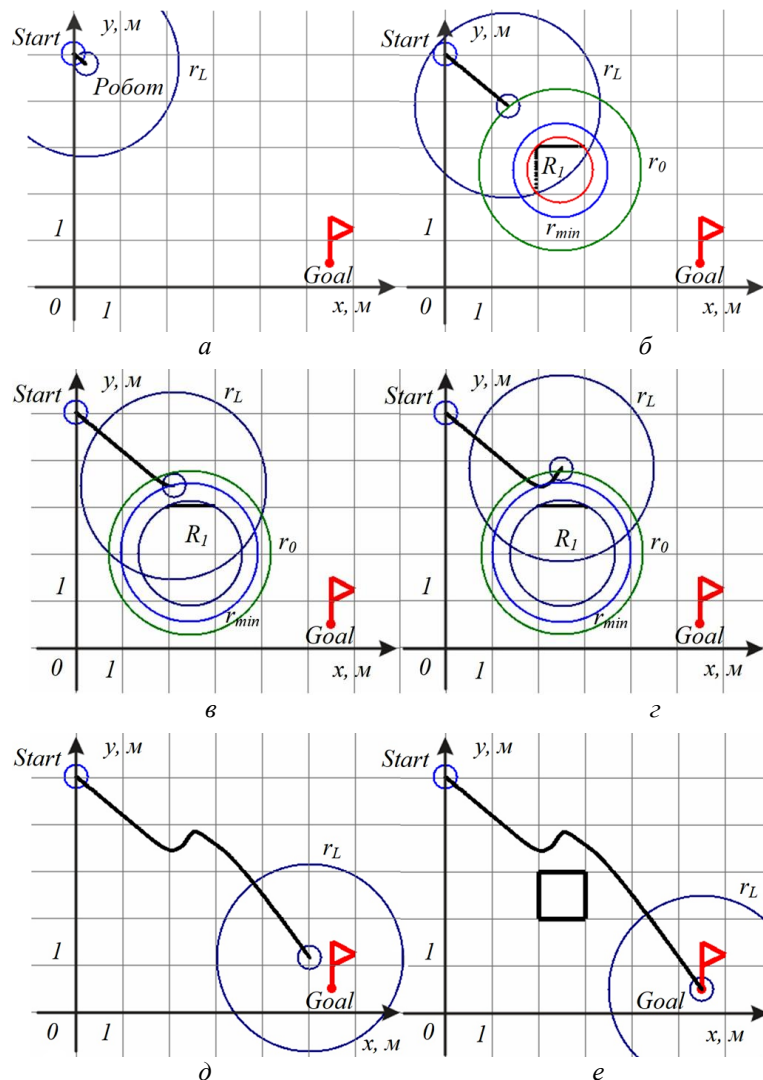


Рис. 2. Целевое движение робота с обходом препятствия:

*а* – свободное движение, препятствие вне зоны видимости лидара  $r_L$ ; *б* – обнаружение препятствия, расчет параметров препятствия; *в* – уклонение от препятствия с переопределением параметров; *г* – выход из отталкивающего, адаптивного поля препятствия; *е* – итог объезда препятствия за заданное время



Для оценки влияния расчетных параметров препятствия на результат планирования движения центра масс мобильного робота были проведены численные эксперименты для случаев,

когда препятствие направлено углом к роботу (рис. 3, *а*) и когда препятствие расположено ребром к роботу (рис. 3, *б*).

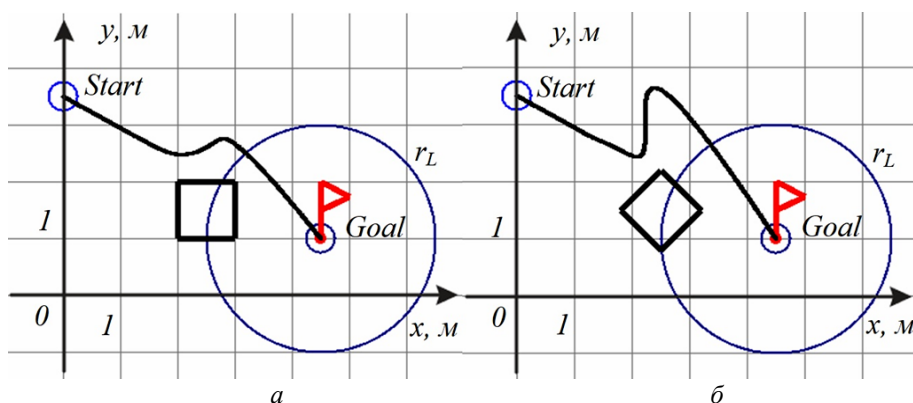


Рис. 3. Влияние ориентации препятствия на синтезируемую траекторию:  
*а* – препятствие – углом к роботу; *б* – препятствие – ребром к роботу

С целью сравнения алгоритмов планирования движения без модификации и с описанной модификацией в составе комбинированного

алгоритма были проведены численные эксперименты, результаты которых представлены на рис. 4.

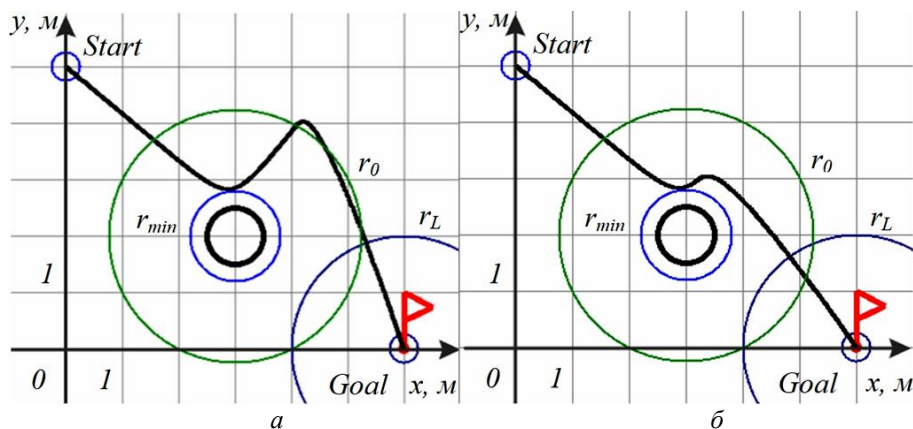


Рис. 4. Сравнение алгоритмов планирования движения робота:  
*а* – работа алгоритма без модификации; *б* – работа модифицированного алгоритма

Предложенный подход к решению проблемы осцилляции мобильного робота под действием отклоняющей силы [9] был интегрирован в комбинированный алгоритм. Для оценки ра-

ботоспособности данного подхода в составе комбинированного алгоритма были проведены численные эксперименты, результаты которых представлены на рис. 5.

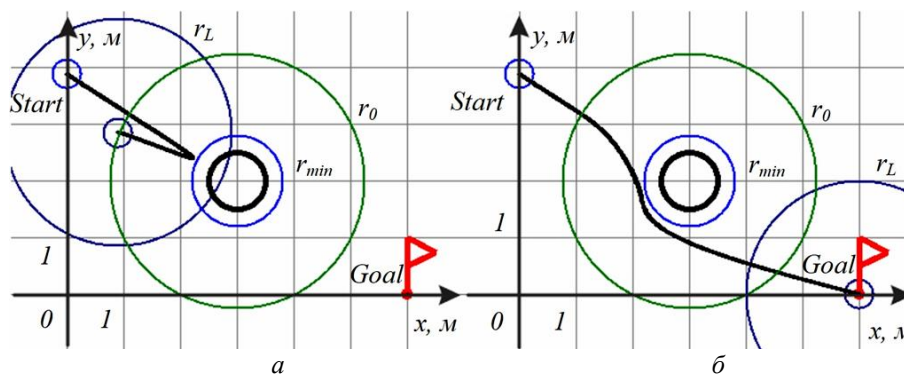


Рис. 5. Сравнение алгоритмов уклонения робота от препятствия:  
 а – на основе силы, направленной от центра препятствия к центру робота;  
 б – на основе силы, перпендикулярной вектору скорости центра масс робота

### Заключение

Проведенные численные эксперименты показывают, что комбинированный алгоритм в общем случае работоспособен. Моделируемый мобильный робот с помощью виртуального сенсора обнаруживает препятствия, рассчитывает их параметры и совершает безударный обход препятствий (рис. 2).

Как следует из рис. 3, при преодолении роботом одного и того же препятствия с разной его пространственной ориентацией, информация об окружающей среде робота существенно влияет на получаемые траектории (законы) движения центра масс мобильного робота к целевой точке.

Введение повторяющейся проверки пересечения аналитической траектории и внутренней границы поля препятствия позволяет сократить время движения мобильного робота (рис. 4) под действием отталкивающей силы (уменьшить значения максимальных ускорений).

Использование отклоняющей силы (перпендикулярной вектору скорости центра масс робота) в модифицированном алгоритме планирования движения мобильного робота обеспечивает синтез более гладких траекторий (законов) движения центра масс робота без его осцилляций (рис. 5).

Комбинированный алгоритм может быть рассмотрен к применению в системах управления мобильных роботов, использующих в качестве основного сенсора двумерный лидар.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yan, K. Mapless Navigation Based on 2D LIDAR in Complex Unknown Environments / K. Yan, B. Ma // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, no. 20. – Art. 5802. – DOI: 10.3390/s20205802.
2. Dang, T.-V. Obstacle Avoidance Strategy for Mobile Robot Based on Monocular Camera / T.-V. Dang, N.-T. Bui // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12, no. 8. – Art. 1932. – DOI: 10.3390/electronics12081932.
3. Azeta, J. Obstacle detection using ultrasonic sensor for a mobile robot / J. Azeta, C. Bolu, D. Hinvi, A. Abioye // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 707. – Art. 012012. – DOI: 10.1088/1757-899X/707/1/012012.
4. Liu, Y. A Review of Sensing Technologies for Indoor Autonomous Mobile Robots / Y. Liu, S. Wang, Y. Xie, T. Xiong, M. Wu // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, no. 4. – Art. 1222. – DOI: 10.3390/s24041222.
5. Быков, А. С. Разработка и совместное моделирование алгоритмов обработки данных о среде, полученных 2D-LIDAR / А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2023. – С. 29–33.
6. Быков, А. С. Классификация препятствий и способы их аппроксимации для задач обхода статических препятствий / А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (287) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2024. – С. 35–40.
7. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени (VC/APF+BC<sub>т</sub><sup>-1</sup>). Ч.1 Теория / А. В. Леонард // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(268) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2022. – С. 34–42.
8. Кошман, А. М. Планирование движения наземного робота с учетом его 2D-пространственной ориентации и обходом одного статического препятствия / А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(275) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2023. – С. 51–57.
9. Быков, А. С. Способ обхода роботом статического препятствия на горизонтальной плоскости с помощью отклоняющей силы / А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // *Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(299) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2025.

УДК 62-526 + 004.932.4

DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-16-22

*А. С. Горобцов<sup>1,3</sup>, В. М. Данилевич<sup>1</sup>, Р. М. Щербов<sup>2</sup>, Н. К. Сафонова<sup>2</sup>, А. А. Рогачёв<sup>2</sup>***РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ  
МАНИПУЛЯТОРА С УПРУГИМИ ЗВЕНЬЯМИ**<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет<sup>2</sup> НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова<sup>3</sup> ИМАШ РАН

vm@vstu.ru, vlad-danilevich.90@inbox.ru, romanscherbov@gmail.com,

safonova.nk@gmail.com, arogachev@imec.msu.ru

Представлены метод управления механическими системами с упругими телами и результаты моделирования управляемого движения манипулятора с упругим звеном. Выполнен сравнительный анализ программного и управляемого движения в системе моделирования ФРУНД. Анализируется устойчивость управляемого движения рабочего органа манипулятора.

*Ключевые слова:* моделирование, манипулятор, динамика упругих тел, управление, обратная задача, устойчивость движения.

*A. S. Gorobtsov<sup>1,3</sup>, V. M. Danilevich<sup>1</sup>, R. M. Shcherbov<sup>2</sup>, N. K. Safonova<sup>2</sup>, A. A. Rogachev<sup>2</sup>***COMPUTATIONAL ANALYSIS OF CONTROLLED MOTION  
OF A MANIPULATOR WITH ELASTIC LINKS**<sup>1</sup> Volgograd State Technical University<sup>2</sup> Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University<sup>3</sup> IMASH RAS

The results of modeling the controlled motion of a manipulator equipped with elastic links are presented. For comparative analysis, program and controlled motions are calculated in the FRUND software package. The inverse kinematics problem is solved. The stability of the controlled motion of the manipulator's working element is analyzed.

*Keywords:* modeling, manipulator, dynamics of elastic bodies, control, inverse problem, stability of motion.

**Введение**

Одной из разновидностей роботов являются коллаборативные роботы – коботы [1]. Коботы – это автоматические механизмы, способные работать на производстве различных продуктов совместно с человеком, что, в свою очередь, позволяет не останавливать производство в случае необходимости физического взаимодействия с людьми [2]. Данные роботы в отличие от стандартных промышленных машин способны отслеживать положение работника в их рабочей зоне и не допускать аварийных ситуаций с помощью датчиков. Коботы, как и промышленные роботы, оснащены манипуляторами и программируемыми устройствами управления, однако значительно меньше, компактнее [3]. Коллаборативные роботы применяются на производстве в решении задач, которые нельзя полностью автоматизировать [4–6]. Несмотря на то что коботы намного безопаснее, методы управления такими роботами сложнее и не всегда эффективны. В связи с этим актуальным является синтез законов их управления.

**1. Теоретическая часть**

Существующие теоретические методы оптимального управления, например, методы Понтрягина и Беллмана, применимы к узкому классу задач, как правило, небольшой размерности. Актуальной является разработка методов, применимых для широкого класса механических систем, математические модели ориентированы на численное решение.

Рассмотрим методы управления, основанные на обобщенной задаче динамического уравнивания [7–8], которая использует уравнения динамики механической системы в виде:

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

где  $x$  –  $n$ -мерный вектор координат;  $p$  –  $k$ -мерный вектор множителей Лагранжа;  $M$  – матрица инерции;  $D$  – матрица коэффициентов уравнений связей;  $f(x, \dot{x}, t)$  – вектор внешних сил;  $h(x, \dot{x}, t)$  – правая часть уравнений связей. При численном интегрировании системы (1) решается система линейных алгебраических уравнений

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}_0 \\ p_0 \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} f(x, \dot{x}, t) \\ h(x, \dot{x}, t) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $A$  – является матрицей коэффициентов из (1). Вектор множителей Лагранжа может быть подразделен как  $p = (p_3^T p_2^T p_1^T)^T$ , где  $p_1$  – вектор множителей Лагранжа размерности  $k_1$ , соответствующих приводам,  $p_2$  – множители Лагранжа некоторых желаемых реакций выбранных связей размерности  $k_2$ ,  $p_3$  – остальные множители. Пусть  $p_2 = p_r(t)$ ,  $p_r(t)$  – некоторые функции, задающие желаемые реакции, которые могут быть обеспечены добавлением в правые части уравнений связей, соответствующих  $p_1$ , неизвестных функций  $w(t)$ , задающих смещения приводов. С учетом этого уравнение (2) может быть переписано следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}^T & p_3^T \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \ddot{x}_0^T & p_{30}^T \end{pmatrix}^T + \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} \ddot{w}(t), \quad (3)$$

где  $A_1, A_2, A_3$  являются подматрицами из  $A^{-1}$ . Из (3) следует, что

$$\ddot{w}(t) = A_2^{-1} (p_r(t) - p_{20}). \quad (4)$$

Программную скорость и перемещения, необходимые для ПД-регуляторов, можно определить путем интегрирования уравнения (4). Уравнение (3) с учетом (4) описывает управляемое движение нелинейной механической системы при критерии минимизации в следующем виде:

$$I = \int_0^T R(p_r(t)) dt, \quad (5)$$

где  $R$  – некоторая положительно определенная функция. В простейшем случае, когда  $p_r = 0$ , следует  $I = 0$ . Очевидно, что (4) гарантирует выполнение критерия:

$$J = \int_0^T \sum_{i=1}^{k_2} q_{2i}(x) dt = 0, \quad (6)$$

где  $q_{2i}(x)$  является правой частью уравнений связей, соответствующих  $p_2$ . Силы оптимального управления в смысле (5) и (6) определяются из

$$p_1 = p_{10} + A_3 \ddot{w}(t). \quad (7)$$

Управляющая сила (момент) в ПД регуляторе привода с учетом программной силы находится по следующей формуле:

$$M = c\delta + d\dot{\delta} + M_{II}(t), \quad (8)$$

где  $c$  – коэффициент обратной связи по ошибке перемещения;  $d$  – коэффициент обратной связи по ошибке скорости;  $\delta$  – ошибка перемещения привода;  $\dot{\delta}$  – ошибка скорости привода;  $M_{II}(t)$  – программная сила, найденная из (7).

## 2. Расчетное исследование

### 2.1. Описание расчетной схемы

Манипулятор состоит из трех подвижных звеньев и основания. Расчетная схема манипулятора в визуализаторе системе моделирования ФРУНД показана на рис. 1. Каждое звено имеет шесть степеней свободы, три звена – 18. Кинематические связи убирают 15 степеней свободы, следовательно, манипулятор имеет три степени свободы и три привода. Кинематическая пара 5 класса – цилиндрический шарнир, моделируется двумя кинематическими парами 3 и 2 класса, расположенными в разных точках – выноски на рис. 1. Все три звена имеют длину равную 500 мм.

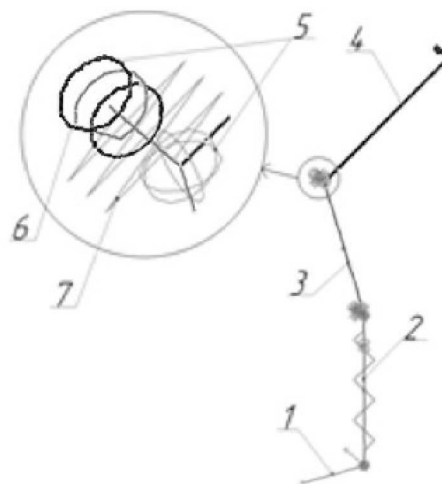


Рис. 1. Модель манипулятора с жесткими звеньями:  
1 – основание; 2 – первое звено; 3 – второе звено; 4 – третье звено;  
5 – цилиндрический шарнир; 6 – соединительный элемент, задающий программную силу; 7 – соединительный элемент, моделирующий ПД регулятор

В дальнейшем третье звено модели будет заменено на два звена той же суммарной длины с упругим элементом между ними. Звенья манипулятора связаны между собой и с основанием цилиндрическими шарнирами.

### 2.2. Задание программного движения

Для описания программного движения схвата используются следующие параметры: смещение по осям –  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ; время движения  $t_2$ . Траектория движения интерполируется тригонометрическими функциями с нулевыми зна-

чениями скорости и ускорения в начальной и конечной точках. На рис. 2 показана зависимость движения точки схвата манипулято-

ра при следующих параметрах:  $\Delta y = 0,5$ ;  $\Delta x = -0,0025$ ;  $\Delta z = -0,5$ ;  $t_2 = 0,2$ , на рис. 3 показана кинограмма движения манипулятора.

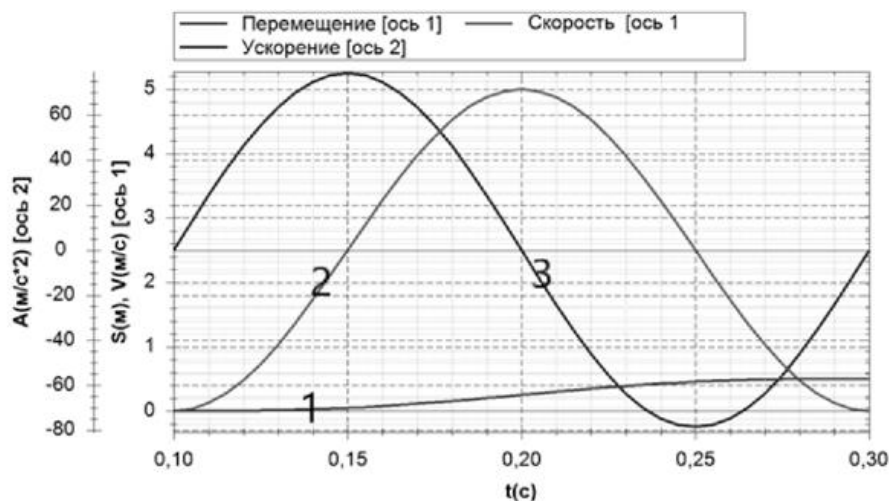


Рис. 2. Программное перемещение, скорость и ускорение точки схвата по оси  $Y$  манипулятора с жесткими звеньями:  
1 – перемещение; 2 – скорость; 3 – ускорение

### 2.3. Решение обратной задачи

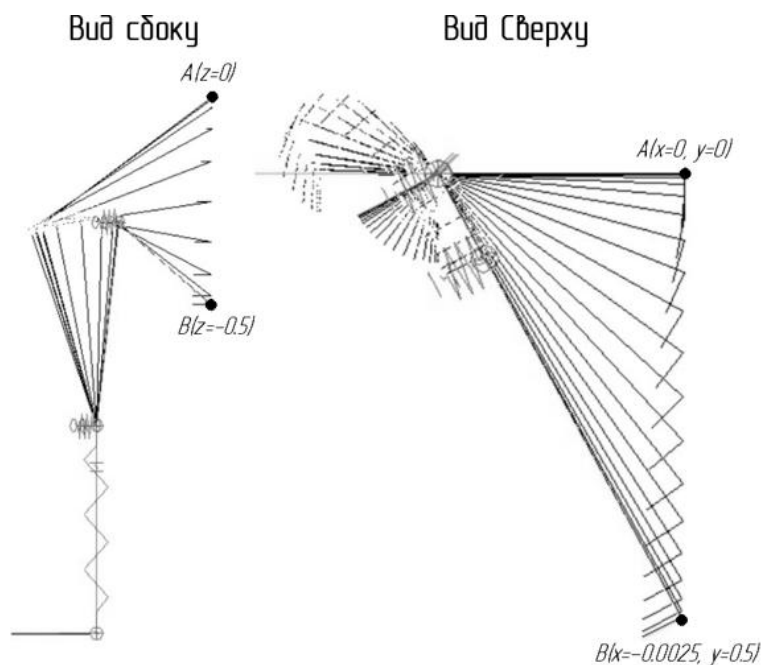


Рис. 3. Кинограмма программного движения манипулятора

Решение обратной задачи позволяет получить законы программного движения приводов. На рис. 4 показаны угловое перемещение

и скорость второго привода в случае жесткого третьего звена.

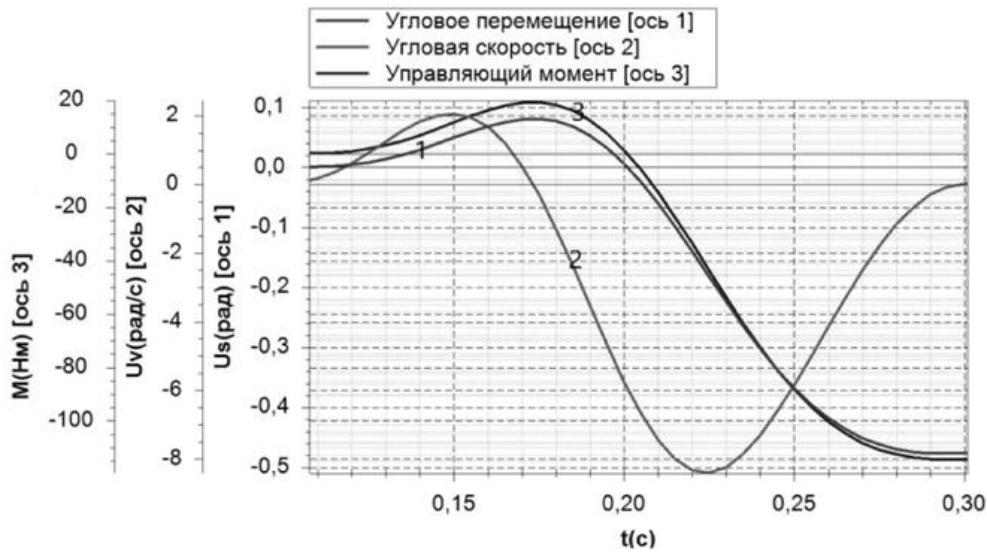


Рис. 4. Угловое перемещение, скорость и управляющий момент второго привода в случае жесткого выходного звена: 1 – угловое перемещение; 2 – угловая скорость; 3 – управляющий момент

#### 2.4. Моделирование управляемого движения манипулятора с упругими звеньями

Для моделирования управляемого движения с учетом упругих звеньев третье звено модели манипулятора было разбито на две части, связанные упругим шарниром по трем угловым координатам. Угловая жесткость по указанным направлениям бралась равной  $c_u = 0,5 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{Рад}$ . Расчетная схема третьего звена манипулятора показана на рис. 5.

В качестве программного движения использовалось движение, показанное на рис. 2. Результаты моделирования управляемого движения представлены на рис. 6, 7.

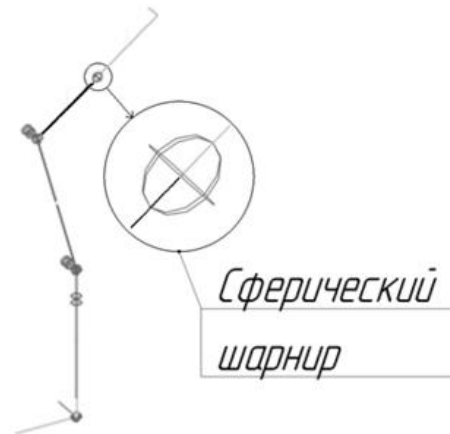


Рис. 5. Модель манипулятора с упругим шарниром

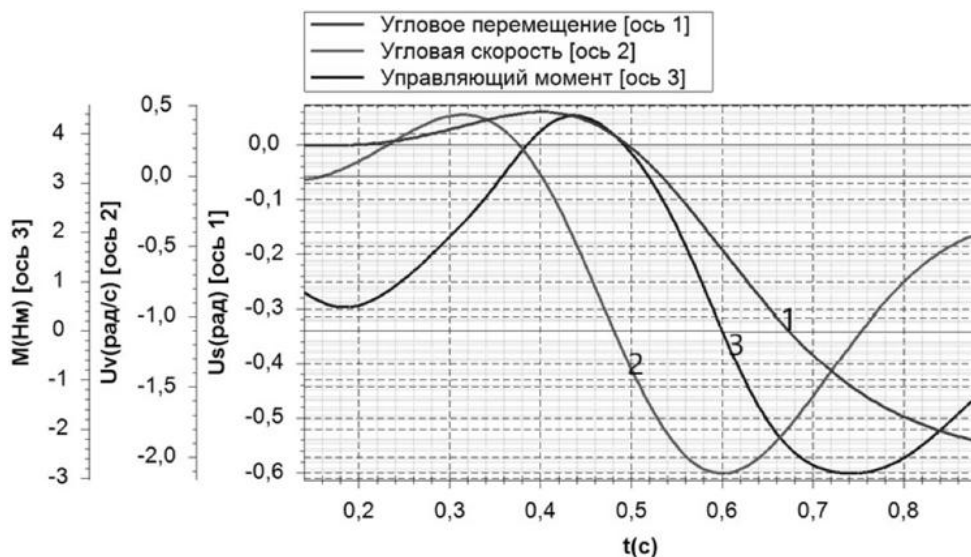


Рис. 6. Угловое перемещение и скорость второго привода в случае упругого выходного звена при управляемом движении: 1 – угловое перемещение; 2 – угловая скорость; 3 – управляющий момент

На рис. 6 показаны графики изменения перемещения, скорости и управляющего момента во втором приводе. В отличие от случая с жестким третьим звеном после достижения схватом целевой точки движение привода не прекращается, а происходит постепенное затухание. Точность положения целевой точки при этом остается достаточно высокой и составляет 0,1–0,2 мм. Таким образом, полученное управление манипулятором с упругим звеном обеспечивает достаточно высокую точность позиционирова-

ния схвата, однако движение звеньев манипулятора не прекращается после выполнения программного движения. В связи с этим выполнен анализ влияния параметров коэффициентов угловой жесткости  $c_u$  и демпфирования  $d_u$  упругого звена на динамику манипулятора. На рис. 7 показана зависимость угла поворота во втором приводе от угловой жесткости звена. Как и следует ожидать, амплитуда колебаний значительно уменьшается с увеличением угловой жесткости.

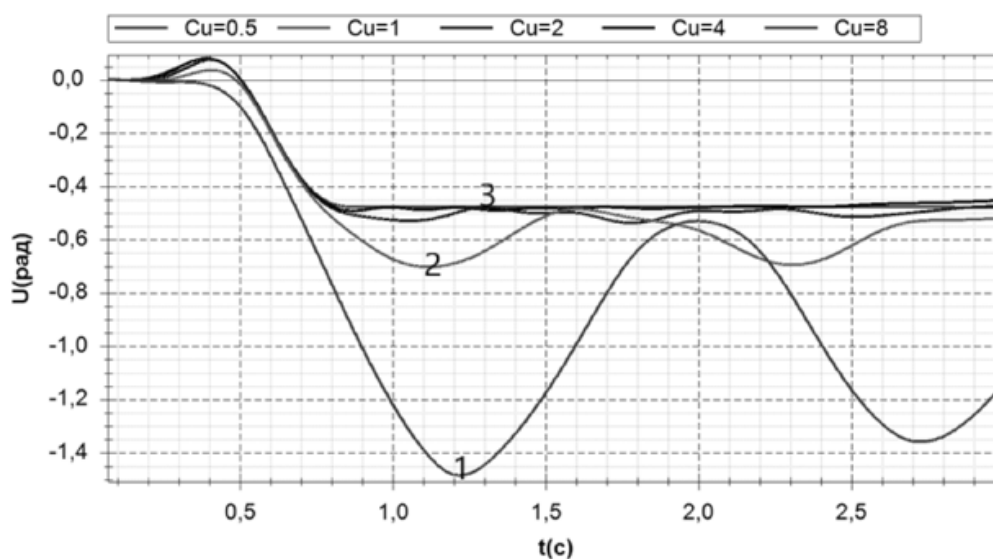


Рис. 7. Зависимость угла поворота второго привода от коэффициента жесткости:  
1 –  $C_u = 0,5$ ; 2 –  $C_u = 1$ ; 3 –  $C_u \geq 2$

Затухание колебаний в приводах также значительно увеличивается с увеличением демп-

фирования в упругой связи (рис. 8).

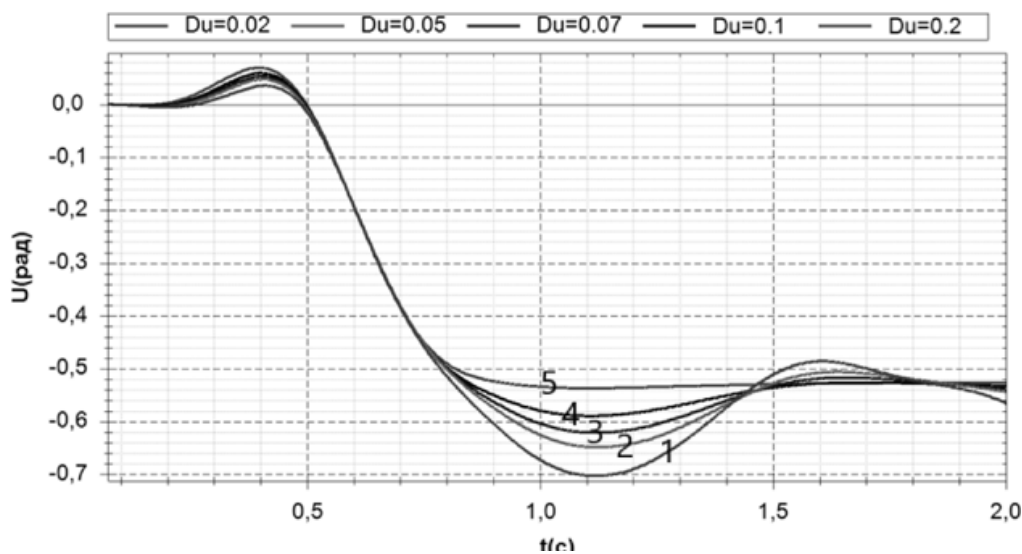


Рис. 8. Зависимость угла поворота второго привода от коэффициента демпфирования:  
1 –  $D_u = 0,02$ ; 2 –  $D_u = 0,05$ ; 3 –  $D_u = 0,07$ ; 4 –  $D_u = 0,1$ ; 5 –  $D_u = 0,2$



Сравнение показало, что увеличение угловой жесткости и демпфирования также поло-

жительно влияет на затухание управляющего момента в приводах (рис. 9, 10).

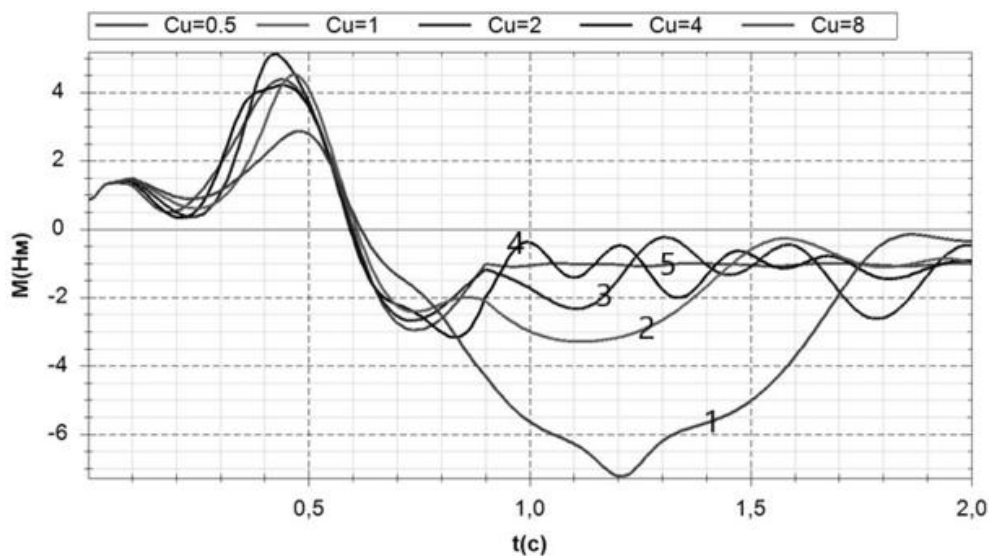


Рис. 9. Зависимость управляющего момента второго привода от коэффициента жесткости:  
1 –  $C_u = 0,5$ ; 2 –  $C_u = 1$ ; 3 –  $C_u = 2$ ; 4 –  $C_u = 4$ ; 5 –  $C_u = 8$

Увеличение параметра коэффициента жесткости, аналогично угловой скорости, положительно влияет на управляющий момент в при-

водах. На рис. 10 показано влияние на момент упругой силы  $d_u$ .

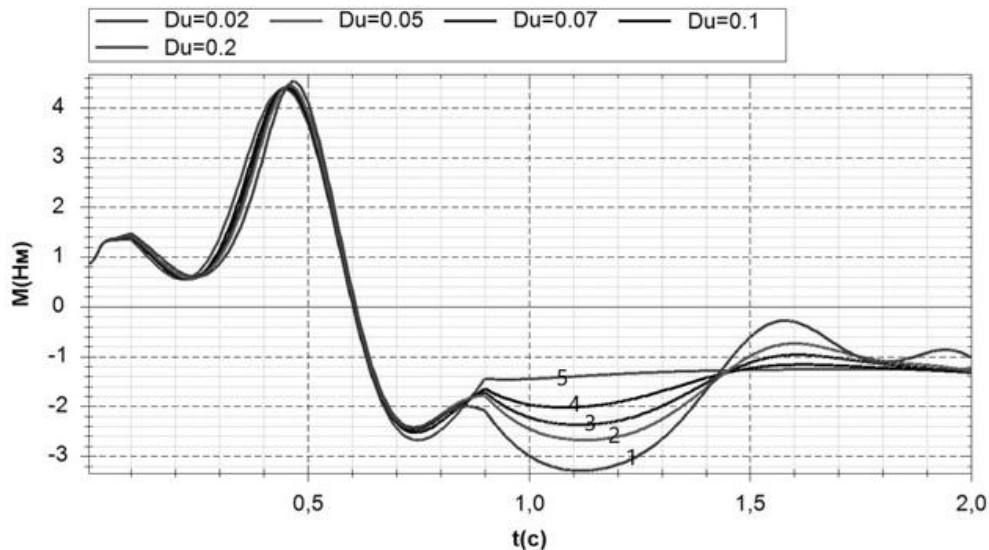


Рис. 10. Зависимость управляющего момента второго привода от коэффициента демпфирования:  
1 –  $D_u = 0,02$ ; 2 –  $D_u = 0,05$ ; 3 –  $D_u = 0,07$ ; 4 –  $D_u = 0,1$ ; 5 –  $D_u = 0,2$

Численное моделирование показало, что увеличение угловой жесткости и демпфирования в упругой связи незначительно увеличивает точность позиционирования схвата.

#### Заключение

В работе созданы две модели манипулятора с жесткими и упругими звеньями. Рассчитаны основные параметры управляемого движения

каждой модели и проведен их сравнительный анализ. Результаты сравнительного анализа показали, что рассматриваемый метод управления, позволяет получить достаточную точность программного движения выходного звена для случая существенно податливых звеньев манипулятора. Использование более высоких значений коэффициентов жесткости и демпфирования

ния позволяет снизить колебания в приводах без потери точности перемещения точки схвата. Метод управления может найти применение в коллаборативных роботах, предназначенных для работы в непосредственной близости с человеком.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hameed, A. Control System Design and Methods for Collaborative Robots: Review [https://www.mdpi.com/2076-3417/13/1/675] / A. Hameed, A. Ordys, J. Mozaryn, A. Sibilska-Mroziewicz. // Appl. Sci. – 2023. – №13. – P. 675. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/app13010675>, свободный (дата обращения 19.05.2024).
2. Mikkel, S. K. Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature [https://www.researchgate.net/publication/342347381\_Collaborative\_Robots\_Frontiers\_of\_Current\_Literature] / S. K. Mikkel, J. K. Roy // Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications. – 2020. – №3(2). – Pp. 13-20. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/342347381>, свободный (дата обращения 19.05.2024).
3. Спыну, Г. А. Промышленные роботы. Конструирование и применение: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вышшк., 1991. – 311 с.
4. Jacob, F. Picking with a robot colleague: A systematic literature review and evaluation of technology acceptance in human-robot collaborative warehouses [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835223002863] / F. Jacob, E.H. Grosse, S. Morana, C.J. König // Journal Computers & Industrial Engineering. – 2023. – № 180. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835223002863>, свободный (дата обращения 19.05.2024).
5. Borboni, A. The Expanding Role of Artificial Intelligence in Collaborative Robots for Industrial Applications: A Systematic Review of Recent Works [https://www.mdpi.com/2075-1702/11/1/111] / A. Borboni, K. V. V. Reddy, I. Elamvazuthi, M. S. AL-Quraishi, E. Natarajan, S. S. Azhar Ali // Journal Machines. – 2023. – № 11(1). – P. 111. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/1/111>, свободный (дата обращения 19.05.2024).
6. Yinggang, X. Review of Collaborative Robot and Its Motion Planning Methods [https://www.researchgate.net/publication/370779755\_Review\_of\_Collaborative\_Robot\_and\_Its\_Motion\_Planning\_Methods] / X. Yinggang, J. Lan // Computer Engineering and Applications Journal. – 2021. – № 57(13). – Pp. 18–13. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/370779755\\_Review\\_of\\_Collaborative\\_Robot\\_and\\_Its\\_Motion\\_Planning\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/370779755_Review_of_Collaborative_Robot_and_Its_Motion_Planning_Methods), свободный (дата обращения 19.05.2024).
7. Горобцов, А. С. Синтез параметров управляемого движения многозвенных механических систем произвольной структуры методом обратной задачи / А. С. Горобцов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 6. – С. 43–50.
8. Горобцов, А. С. Обобщенная задача динамического уравнивания и перспективные направления ее применения / А. С. Горобцов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 3 (756). – С. 14–24. – DOI: 10.18698/0536-1044-2023-3-14-24.

УДК621.865.8:681.5

DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-22-26

**Е. Н. Захаров, И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева, А. Г. Иванов, Н. В. Бабоченко**

#### ПРИНЦИП РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ-ТРИПОДОМ

**Волгоградский государственный аграрный университет**

evgeny\_zakharov@mail.ru, ivan\_nesmiyanov@mail.ru, vgsxa@mail.ru,  
leha\_2106@list.ru, nat-krivelskaya@mail.ru

Статья посвящена разработке принципа реализации интеллектуального управления манипулятором-триподом с использованием средств экспертной системы. Рассматривается интеграция технологий искусственного интеллекта для обеспечения высокоэффективного и адаптивного управления триподом, предназначенным для выполнения сложных манипуляций в условиях динамической среды. В статье описаны ключевые особенности системы управления манипулятором-триподом, а также роль экспертных систем в обработке и анализе данных для принятия оптимальных управляющих воздействий.

**Ключевые слова:** интеллектуальное управление, экспертная система, автоматизация, манипулятор-трипод, позиционирование.

**E. N. Zakharov, I. A. Nesmiyanov, N. S. Vorobyova, A. G. Ivanov, N. V. Babochenko**

#### THE PRINCIPLE OF IMPLEMENTING INTELLIGENT CONTROL OF A MANIPULATOR-TRIPOD

**Volgograd State Agrarian University**

The article is devoted to the development of the principle of implementing intelligent control of a tripod manipulator using expert system tools. The integration of artificial intelligence technologies to ensure highly efficient and adaptive control of a tripod designed to perform complex manipulations in a dynamic environment is considered. The article describes the key features of the tripod manipulator control system, as well as the role of expert systems in data processing and analysis to make optimal control actions.

**Keywords:** intelligent control, expert system, automation, tripod arm, positioning.

В условиях быстрого совершенствования технологий автоматизации и робототехники одним из ключевых элементов, обеспечивающих их развитие, являются манипуляторы. Они играют важную роль в повышении эффективности и производительности технологических процессов, способствуя более рациональному использованию ресурсов и времени [1].

Известна конструкция манипулятора параллельно-последовательной структуры, состоящая из четырех управляемых исполнительных

цилиндров (рис. 1). Цилиндры 1–3 закреплены на треугольном поворотном основании 5 при помощи двух подвижных шарниров, их противоположные концы соединены специальным шарнирным узлом 6, к которому крепится захват. Цилиндр 4 позволяет менять угол положения поворотного основания относительно его оси, что увеличивает рабочую зону манипулятора. Данная конструкция обладает высокой жесткостью и точностью позиционирования [2].

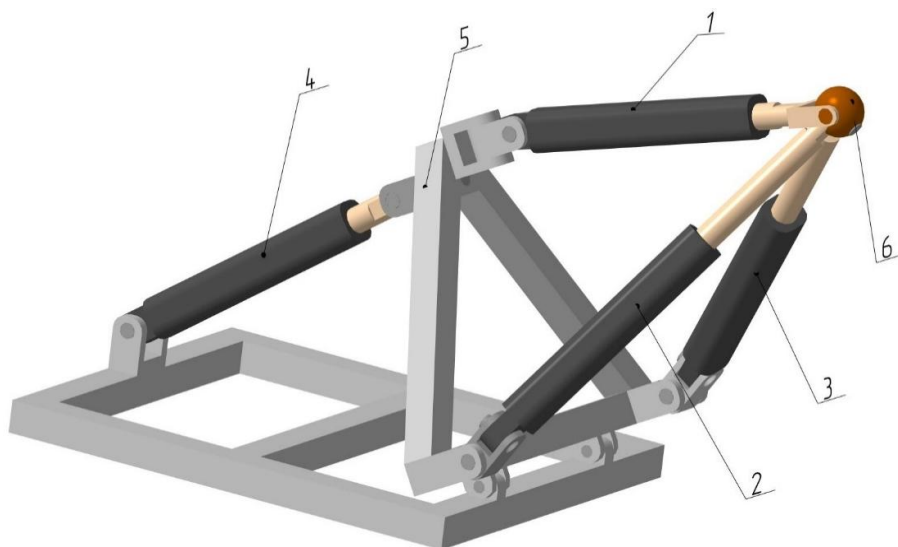


Рис. 1. Манипулятор-трипод с четырьмя исполнительными звеньями

Управление таким манипулятором требует интеграции сложных алгоритмов и методов искусственного интеллекта для обеспечения точности, адаптивности и устойчивости его работы в различных условиях [3–5]. Исследование принципов реализации интеллектуального управления с использованием экспертных систем позволяет разрабатывать новые подходы, которые могут значительно улучшить характеристики манипулятора и расширить их возможности в самых разных отраслях [6].

Для повышения автономности, адаптивности и эффективности работы предлагается интегрировать экспертную систему с системой управления манипулятором [7]. Экспертная система (ЭС) – это программа, основанная на правилах (базе знаний) и логике принятия решений, которая имитирует рассуждения эксперта в конкретной области [8]. То есть в данном случае она принимает решения на основе входных данных, получаемых, например, с камер или датчиков, и формирует команды для контроллера манипулятора, такие как «взять деталь», «избежать

столкновения» и др. База знаний представляет собой базу возможных элементарных перемещений исполнительного органа манипулятора для реализации элементарных траекторий в пространстве. Реализация интеллектуального управления манипулятором-триподом с интегрированной экспертной системой требует комплексного подхода, включающего моделирование, разработку алгоритмов, интеграцию экспертной системы и тщательное тестирование. Такая система позволит значительно повысить эффективность и надежность работы манипулятора в различных условиях.

Одним из самых важных аспектов является разработка алгоритмов для оптимального планирования траекторий грузозахватного органа [9]. ЭС сможет анализировать текущую информацию о положении и состоянии устройства, а также о характеристиках внешней среды, включая препятствия и другие объекты. На основе этих данных система управления сформирует оптимальную траекторию, минимизировав инерционные нагрузки и энергозатраты.

Для обеспечения точного позиционирования захвата с учетом ограничений на перемещение звеньев манипулятора-трипода в пространстве и обхода препятствий, нужно разработать специализированное программное обеспечение, которое сможет равномерно распределять избыточные управляющие сигналы между всеми звеньями манипулятора, так как если одно из звеньев достигает границы своей рабочей зоны, другие звенья могут сохранять

возможность перемещения в пределах своих областей. Это позволит достичь требуемого положения выходного звена за счет корректировки движения остальных звеньев [10]. Такой способ управления можно назвать координатно-согласованным распределенным управлением.

Схема системы управления с блоком координатно-согласованного распределенного управления представлена на рис. 2.

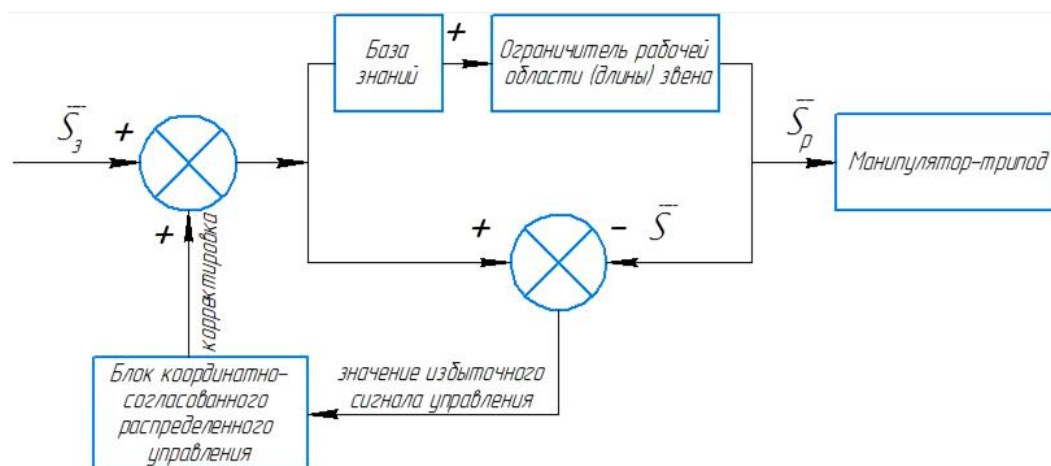


Рис. 2. Схема системы интеллектуального управления

Система получает входные данные о требуемом положении или движении каждого звена манипулятора в виде задающего вектора линейного перемещения  $\vec{S}_3$ . На основе полученных данных рассчитываются необходимые координаты каждого элемента. Система распределяет задачи между управляемыми элементами с учетом их текущих положений и ограничений по рабочей области. Чтобы достичь заданной цели, обеспечивается согласованное движение всех элементов. Во время перемещения захвата система получает обратную связь от датчиков, установленных на каждом звене, в виде задающего вектора линейного перемещения  $\vec{S}_3$  и реального вектора  $\vec{S}$ , блока координатно-согласованного распределенного управления, что позволяет корректировать их движение, получив сигнал в виде результирующего вектора  $\vec{S}_p$ .

Предложенный блок управления, как программный компонент, нуждается в настройке с использованием численных коэффициентов [11]. Эти коэффициенты используются для корректировки вектора линейных перемещений звеньев манипулятора. Вычисление коэффициентов будет осуществляться после выбора траектории движения выходного звена. Неизмен-

ной величиной должно оставаться положение конечного звена, а относительно него устройство вычисляет положения других звеньев. Также эта система задействована для распределения управляющих воздействий приводам так, чтобы механизм смог избежать нежелательных столкновений.

Экспертная система позволит запрограммировать в блоке координатно-согласованного распределенного управления условия распределения излишнего управляющего воздействия на другие доступные звенья. С точки зрения экспертной системы, основным методом позиционирования манипулятора является решение обратной задачи кинематики, поскольку заданное положение конечного звена является ключевым условием для его точного выполнения. Механизм принятия решения представлен в виде блок-схемы на рис. 3.

Решение обратной задачи кинематики сложнее, чем решение прямой. Сложность заключается не только в определении числа доступных решений, но и в выборе наиболее подходящих из них.

Для этого сначала экспертной системе необходимо вычислить рабочую область, т. е. ту часть

пространства, которую конечное звено в принципе могло достичь с условием, что у всех звеньев нет ограничений по линейным перемещениям. После этого наложить на данную область ограни-

чения звеньев по положению и, таким образом, получить доступную рабочую область, в пределах которой и будет лежать множество возможных траекторий перемещения манипулятора.

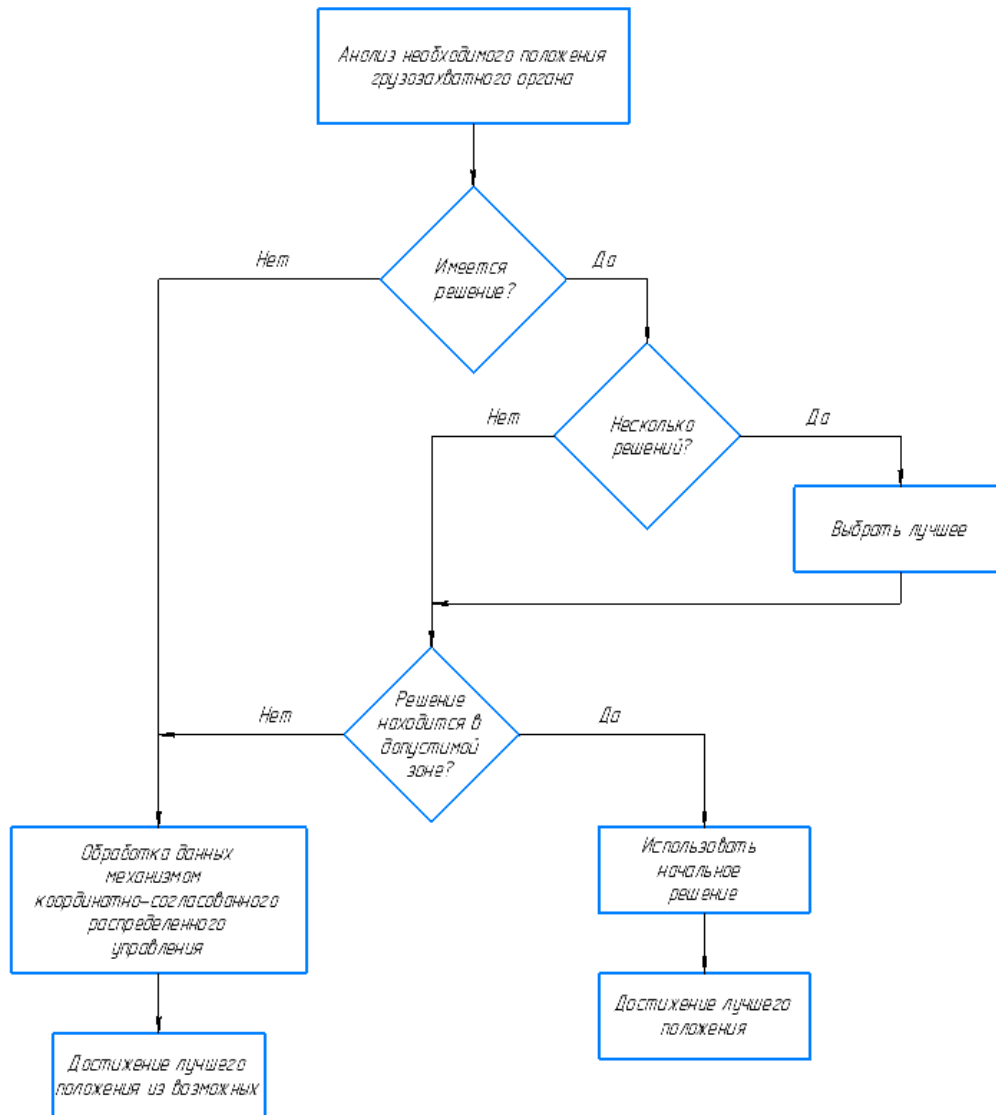


Рис. 3. Алгоритм обработки сигналов и принятия решения экспертной системой

Для обеспечения эффективного позиционирования манипулятора система управления будет руководствоваться тремя ключевыми принципами: 1) пространственной точности; 2) энергетического минимализма; 3) временного оптимума.

Когда заданное перемещение выходит за пределы допустимой области для движения звеньев, цель считается недостижимой в полном объеме. В такой ситуации активируется блок координатно-согласованного распределенного управления. Это позволяет оптимально перераспределить те части перемещений, которые невозможно выполнить конкретным зве-

ном, на другие звенья с еще не исчерпанным ресурсом перемещения. Такой подход помогает достичь положения, максимально приближенного к требуемому.

Проблема позиционирования манипулятора с учетом пространственных ограничений и решение соответствующих этому прямой и обратной кинематических задач может быть выполнена с помощью экспертной системы. Экспертные системы могут использовать знания и опыт специалистов для принятия решений и решения сложных задач, таких как управление роботами и манипуляторами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сковорцов, Е. А. Переход сельского хозяйства к цифровым, интеллектуальным и роботизированным технологиям / Е. Г. Сковорцова, И. С. Санду, Г. А. Иовлев // Экономика региона. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 1014–1028.
2. Воробьева, Н. С. Исследование манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода / Н. С. Воробьева, И. А. Несмиянов, В. В. Жога [и др.]. – Волгоград : Волгоградский государственный аграрный университет, 2022. – 272 с.
3. Патент № 219687 U1 Российская Федерация, МПК B25J 13/02. Устройство ручного управления манипулятором-триподом / Е. Н. Захаров, И. А. Несмиянов, А. Г. Иванов, А. Ю. Китов; ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет». – 2023.
4. Свидетельство № 2021619638 Российская Федерация. Динамическая модель управления манипулятором-триподом по задаваемой траектории / В. В. Дяшкин-Титов, И. А. Несмиянов, В. В. Жога [и др.]; ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет». – 2021.
5. Свидетельство № 2021619639 Российская Федерация. Программа для реализации алгоритма управления манипулятором-триподом компенсационного типа / В. В. Дяшкин-Титов, В. В. Жога, Н. С. Воробьева [и др.]; ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет». – 2021.
6. Несмиянов, И. А. Моделирование геометрико-статистических характеристик манипулятора-трипода / И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева, В. В. Дяшкин-Титов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2024. – № 17. – С. 60–64.
7. Савченко, О. Ф. Методологические аспекты создания информационных систем в сельском хозяйстве // Достижения науки и техники АПК. – 2006. – № 11. – С. 5–10.
8. Экспертные системы: принципы работы и примеры / А. Брукинг [и др.]; под ред. Р. Форсайта; пер. с англ. С. И. Рудаковой; под ред. В. Л. Стераника. – М. : Радио и связь, 1987. – 220 с.
9. Воробьева, Н. С. Синтез программных перемещений и алгоритмов систем управления реконфигурируемых манипуляторов параллельно-последовательной структуры : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, 2023. – 473 с.
10. Mutambara, A. G. A framework for a Supervisory Expert System for Robotic Manipulators with Joint-Position Limits and Joint Rate Limits / A. G. Mutambara, J. Litt // – National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Center, 1998. – 22 p.
11. Частиков, А. П. Экспертная система позиционирования манипулятора с учетом ограничений по положению / А. П. Частиков, В. Г. Корниенко, К. Е. Тотухов // Перспективы развития информационных технологий. – 2011. – № 3–1. – С. 156–160.

УДК 621.865.8:621.65

DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-26-30

*В. И. Карлов, Ю. И. Крыхтин*

# К РАЗРАБОТКЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ АГРЕГАТОМ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ГРП

Волгоградский государственный технический университет

kvi\_au@mail.ru; fotino-sk@mail.ru

Рассмотрены актуальные вопросы проектирования гидравлической системы дистанционного управления режимами работы силового агрегата с дизельным двигателем внутреннего сгорания (ДВС) эффективной мощностью до 6000 л. с. и с механической высокооборотной, десятискоростной двухпоточной с двумя одинаковыми промежуточными валами коробкой перемены передач (КПП) высокопроизводительной насосной установки для глубокопроникающего гидроразрыва перемычек пластов (ГРП) нефтяных и газовых изолированных полостей.

**Ключевые слова:** силовой агрегат, высокооборотная двухпоточная механическая КПП, дисковое фрикционное устройство, гидравлическая система, золотниковый распределитель, дистанционное управление.

*V. I. Karlov, Yu. I. Krykhtin*

# TO THE DEVELOPMENT OF A HYDRAULIC SYSTEM REMOTE CONTROL OF THE POWER UNIT OF A HIGH-POWER PUMPING UNIT FOR GRP

Volgograd State Technical University

The article considers current issues of designing a hydraulic system for remote control of the operating modes of a power unit with a diesel internal combustion engine (ICE) with an effective capacity of up to 6000 hp and with a mechanical high-speed, ten-speed, two-flow gearbox (GCB) with two identical intermediate shafts of a high-performance pumping unit for deep-penetrating hydraulic fracturing of formation bridges (HFB) of oil and gas isolated cavities.

**Keywords:** power unit, high-speed dual-flow mechanical transmission, disc friction device, hydraulic system, spool valve, remote control.

Для обеспечения передовых позиций отечественной нефте-газодобывающей отрасли необходимо создание собственных высокопроизводительных насосных установок для глубокого проникновения ГРП нефтяных и газовых изо-

лированных полостей, составляющих основу комплекса оборудования (флота) для такого способа добычи полезных ископаемых.

Структурная схема этой установки показана на рис. 1.

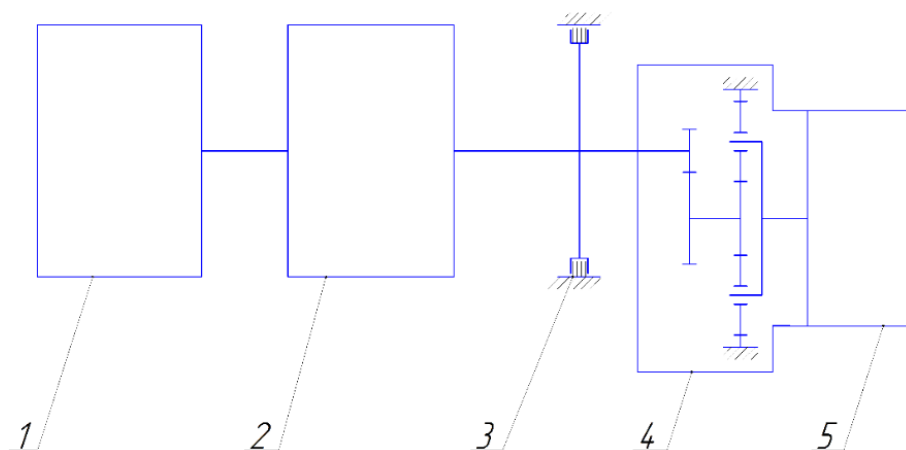


Рис. 1. Структурная схема насосной установки для ГРП нефтяных и газовых изолированных полостей: 1 – ДВС; 2 – КПП; 3 – остановочный тормоз (ОТ); 4 – цилиндрико-планетарный редуктор узла гидронасоса с передаточным числом  $i_n = 1,16$  цилиндрической ступени (межцентровое расстояние 500 мм по компоновке узла гидронасоса), и передаточным числом  $i_n = 5,5$  планетарной ступени; 5 – гидронасос

Мощный силовой привод такой насосной установки обеспечивает высокопроизводительную закачку в скважину специальной рабочей среды – пропанта для расклинивания трещин в перемычках пластов и удержания их от схлопывания при сбросе давления. Учитывая, что в соответствии с технологией процесса ГРП, требуется обеспечить стабильный режим подачи сложного в перекачке пропанта, для насосной установки большой мощности, актуальным является создание системы дистанционного управления силовым приводом во взаимосвязи с его нагруженностью и параметрами рабочего процесса закачки пропанта в скважину.

Цель работы – создание необходимых предпосылок проектирования системы дистанционного управления параметрами рабочих процессов ГРП нефтяных и газовых изолированных полостей с учетом нагруженности силового агрегата насосной установки.

Новизна – определение концепции и предложения по разработке схемы и элементов конструкции исполнительных устройств гидравлической системы дистанционного управления переключением передач без разрыва потока мощности высокооборотной механической десятискоростной двухпоточной КПП с двумя одинаковыми промежуточными валами через встроенные в КПП дисковые фрикционные

устройства с металлокерамическим покрытием дисков трения.

В силовом агрегате по патенту на изобретение [1], кинематическая схема которого показана на рис. 2, промежуточный вал 10-скоростной 2-поточной КПП связан с крайней шестерней раздаточного цилиндрического редуктора с передаточным числом  $i = 1$ , центральная шестерня которого связана с солнечной шестерней входного повышающего обороты планетарного редуктора, а вторая крайняя шестерня раздаточного цилиндрического редуктора связана с аналогичным вторым промежуточным валом КПП. ДВС такого силового агрегата может иметь эффективную мощность от 3000 до 6000 л. с., а промежуточные валы высокооборотной механической КПП вращаются с угловыми скоростями, близкими к максимально допустимым по условию работоспособности подшипников, на которых они установлены. В конструкции КПП предусмотрено пять основных передач (при включенной в дополнительный поток мощности фрикционной муфте Ф6 включение тормоза Т1 создает первую основную передачу; включение муфты Ф2 создает вторую основную передачу; – Ф3 – третью, Ф4 – четвертую и Ф5 – пятую основные передачи) и пять передач замедленных (при включенной в дополнительный поток мощности фрикционной муфте Ф7).



Для обеспечения работоспособности силового агрегата насосной установки на всех передачах, своевременного и оперативного переключения на нужную передачу при всех изме-

нениях параметров рабочего процесса необходима простая и эффективная система управления кинематическими звеньями КПП и обеспечения их смазкой.

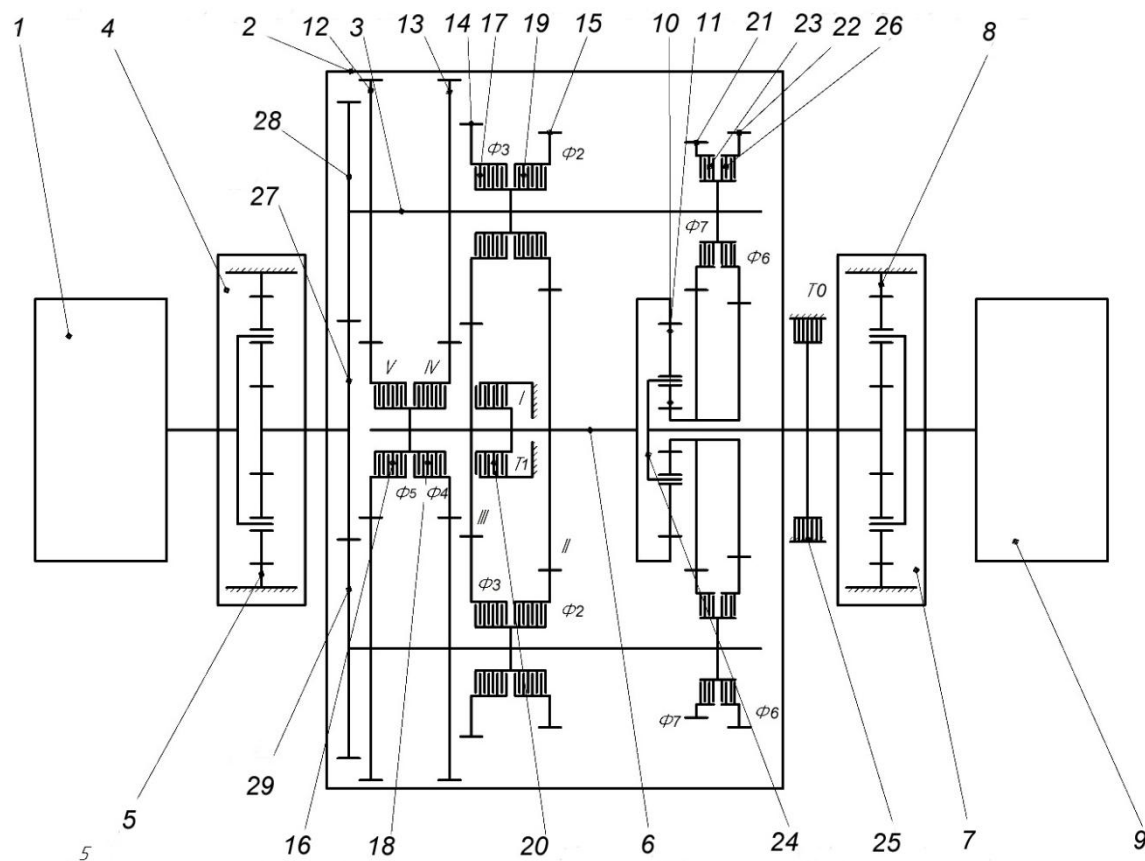


Рис. 2. Кинематическая схема силового агрегата насосной установки для ГРП нефтяных и газовых изолированных полостей с высокооборотной механической КПП с двумя промежуточными валами: 1 – ДВС; 2 – КПП; 3 – промежуточный (входящий) вал; 4 – повышающий обороты планетарный редуктор; 5 – шестерня эпициклическая; 6 – грузовой вал; 7 – понижающий обороты планетарный редуктор; 8 – шестерня эпициклическая; 9 – гидронасос; 10 – солнечная шестерня суммирующего планетарного ряда; 11 – шестерня эпициклическая суммирующего планетарного ряда; 12–15 – ведущие шестерни основного потока мощности; 16 (Ф5), 17 (Ф3), 18 (Ф4), 19 (Ф2) – фрикционные муфты основного потока мощности; 20 – дисковый тормоз нижней передачи; 21, 22 – ведущие шестерни дополнительного потока мощности; 23 (Ф7), 26 (Ф6) – фрикционные муфты дополнительного потока мощности; 24 – водило суммирующего планетарного ряда; 25 – тормоз остановочный (Т0); 27, 28, 29 – шестерни раздаточного цилиндрического редуктора

Известны гидравлические системы ручного управления механической трансмиссий транспортных средств [2–4], элементную базу которых составляют шестеренчатые насосы, клапаны, средства очистки рабочей жидкости, радиатор, золотниковые распределители с ручным управлением. На их основе предлагается создать исполнительную подсистему по управлению кинематическими звеньями КПП и их смазке в процессе работы, упрощенная гидравлическая схема которой показана на рис. 3.

Предлагаемая исполнительная подсистема смазки и управления состоит из двух одноименных магистралей. Первая, по важности – это магистраль управляющего давления поряд-

ка 0,8 МПа. Здесь насосами Н2 и Н3, масло забирается из основного бака Б2, проходит очистку в гидроциклоне ГЦ1 и подается к распределителям Р4 и Р3, а далее по сигналу командного устройства с помощью распределителей Р1.1; Р1.2; Р2; Р3.1 направляется в рабочую полость (бустер) управляемого фрикционного устройства по одному из следующего списка групп фрикционных устройств, соответствующих ранее перечисленным распределителям: Ф2÷Ф5; Т1(Ф1); Ф6÷Ф7; Т0. Тем самым включают нужную передачу КПП или Т0. Чтобы не допустить включение Т0 с какой-либо передачей КПП и обеспечить холостой режим работы силовому приводу, зафиксировав положение

подвижных частей насоса, в управляющей магистрали предусмотрены двухпозиционные распределители P3.1, P3.2 и P4, электромагниты которых включены в одну электрическую цепь, отмеченную на рис. 3 штриховой линией. Таким образом, отключение бустеров фрикционных устройств основного и вспомогательного потоков мощности КПП от управляющего давления приводит к одновременному включению Т0 и наоборот. Агрегатный распределитель P1 состоит из 4-позиционного распределителя

P1.1 с сервоприводом и ручным дублером, предназначенного для управления давлением в бустерах фрикционных муфт основного потока мощности КПП, и двухпозиционного распределителя P1.2 с электромагнитом, предназначенного для подвода управляющего давления либо к тормозу Т1 (фрикционный механизм Ф1), либо к распределителю P1.1 (а значит, к группе фрикционных муфт Ф2÷Ф5, управляющих кинематическими звеньями КПП в основном потоке мощности).

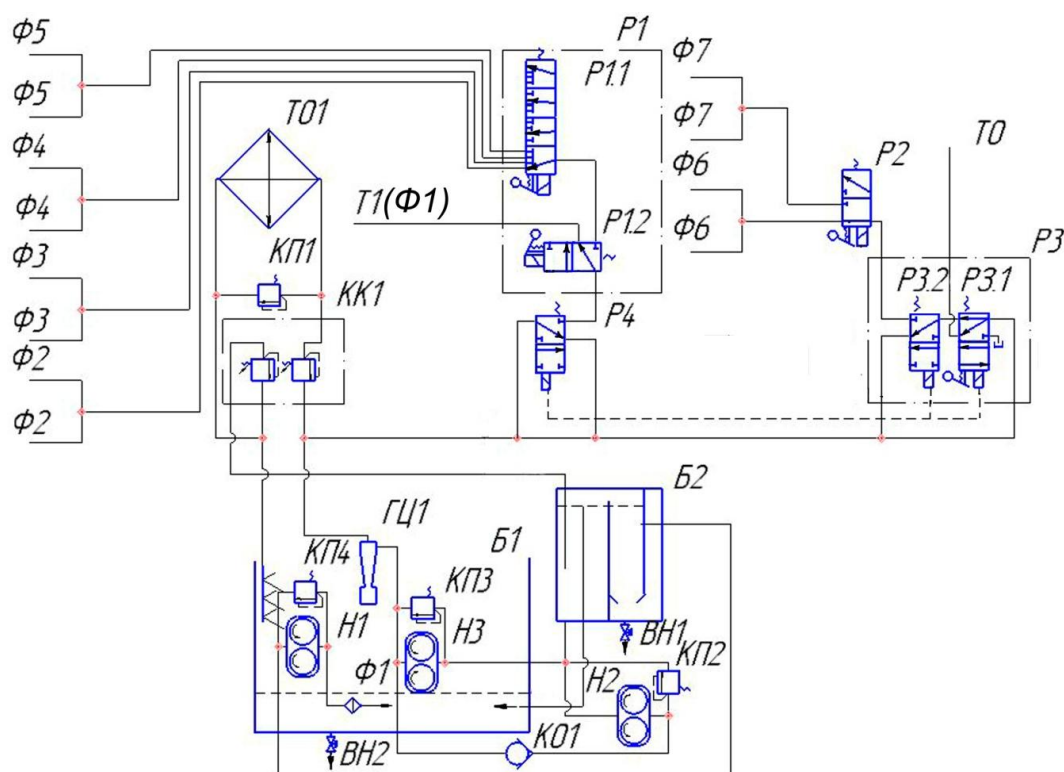


Рис. 3. Упрощенная гидравлическая схема исполнительной подсистемы смазки и управления кинематическими звеньями специальной механической КПП силового агрегата насосной установки для ГРП нефтяных и газовых изолированных полостей:

ТО1 – теплообменник (радиатор); Б1 – картер КПП; Б2 – бак масляный; Н1, Н2, НЗ – шестеренчатые гидравлические насосы, причем Н1 – насос для откачки стекающего в картер КПП масла в основной масляный бак Б2, подачи масла в теплообменник и разбрызгивания масла в КПП для создания масляного тумана и смазки зубчатых зацеплений; Н2 и НЗ – два параллельно работающих нагнетательных насоса, предназначенные для переключения передач в КПП, один из которых (НЗ) имеет механический, а другой (Н2) – электрический приводы; ВН1, ВН2 – вентили (краны) для слива масла из баков; КПП1, КПП2, КПП3, КПП4 – гидроклапаны перепускные (предохранительные); КК1 – коробка с перепускными (предохранительными) клапанами; Ф1 – фильтр заборный; КО1 – клапан обратный; ГЦ – гидроциклон для очистки масла (рабочей среды); P1, P2, P3, P4 – гидравлические распределители рабочего давления для управления кинематическими звеньями КПП и Т0, причем золотниковый распределитель P1 управляет кинематическими звеньями в основном потоке мощности (через фрикционные муфты Ф2, Ф3, Ф4, Ф5 и тормоз Т1 – фрикционное устройство Ф1); распределитель P2 выполняет ту же функцию, что и P1, но в дополнительном потоке мощности (через фрикционные муфты Ф6 и Ф7); P3.1 управляет остановочным тормозом Т0

Сброс рабочего давления в бустерах фрикционных устройств при выключении передач происходит не по выделенной для этого сливной магистрали, а, с целью упрощения системы, в картер КПП вследствие негерметичности самих бустеров, после отключения управляющего

давления. При этом улучшаются условия смазки конструктивных элементов КПП. Исключение составляет остановочный тормоз Т0, для которого на схеме показана сливная линия, хотя и в этом случае слив может производиться в бак, конструктивно объединенный с картером КПП.

Вторая магистраль – служит для смазки конструктивных элементов КПП и кондиционирования (очистка и охлаждение) рабочей жидкости. Здесь с помощью шестеренчатого насоса Н1 масло откачивается из картера Б1 КПП, под давлением порядка 0,2 МПа доводится до соответствующей кондиции (проходит через устройства очистки и теплообменный аппарат – радиатор) и разбрызгивается в корпусе КПП с образованием «масляного тумана», капли которого оседают на поверхности зубчатых пар и других конструктивных элементов КПП, обеспечивая их смазку.

После запуска силового агрегата и создания необходимого давления в смазочной и управляющей магистрали, в соответствии с программой выхода на рабочий режим закачки пропанта в скважину, включаются соответствующие фрикционные муфты по одной в дополнительном и основном потоках мощности КПП путем одновременного включения и выключения одинаковых фрикционных муфт обоих промежуточных валов КПП.

Предлагается следующая последовательность действий при работе с системой управления высокооборотной десятискоростной двухпоточной с двумя одинаковыми промежуточными валами с металлокерамическими дисками трения во фрикционных устройствах КПП силового агрегата большой мощности для глубокопроникающего ГРП нефтяных и газовых изолированных полостей:

1. Установить все звенья системы управления в исходное (начальное) положение перед началом работы (электромагниты всех распределителей и сервопривод распределителя Р1.1 выключены). При работающем силовом приводе по магистрали управляющего давления посредством Р3.1 включается остановочный тормоз Т0.

2. Включить Р3 и связанный с ним одной электрической цепью Р4 с тем, чтобы через включенный Р3.1 отключить Т0, а через выключенный Р1.2 включить тормоз Т1 (фрикционное устройство Ф1) в основном потоке мощности КПП и через выключенный Р2 включить ускоренную передачу на двух промежуточных валах в дополнительном потоке мощности. Таким образом будет включена первая ускоренная передача. При необходимости включением Р2 можно перейти на первую замедленную передачу;

3. Включить Р1.2 и с помощью сервопривода распределителя Р1.1 последовательно включать передачи со второй по пятую ускоренные, если Р2 выключен или замедленные, если Р2 включен;

4. По окончании работ силового агрегата выключить Р3 и связанный с ним одной электрической цепью Р4, тем самым переведя все звенья системы управления в исходное состояние.

В настоящее время исследуются особенности разработанной системы гидроуправления, пути повышения надежности ее работы по быстрдействию, синхронности и одновременной работе фрикционных муфт, расположенных на разных промежуточных валах КПП.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2811820 Российская Федерация, МПК F04B 47/00. Силовой агрегат насосной установки для глубокопроникающего гидравлического разрыва перемычек изолированных полостей нефтяных и газовых пластов / Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов; ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – 2024.
2. Балдин, В. А. Теория и конструкция танков. – М.: Министерство Обороны Союза ССР, 1975. – 442 с.
3. Боевая машина пехоты БМП-2: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М.: Военное издательство, 1988. – 325 с.
4. Труханов, В. М. Трансмиссии гусеничных и колесных машин / В. М. Труханов, В. Ф. Зубков, Ю. И. Крыхтин, В. Ф. Желтобрюхов. – М.: Машиностроение, 2001. – 736 с.

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5  
DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-31-35

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

**ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ  
С ОБХОДОМ ДВУХ СТАТИЧНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ,  
РАСПОЛОЖЕННЫХ НА НЕЗНАЧИТЕЛЬНОМ УДАЛЕНИИ ДРУГ ОТ ДРУГА**

**Волгоградский государственный технический университет**

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

В статье рассматривается модификация метода автоматического планирования движения мобильного робота ( $VC/APF+BC_{\tau}^I$ ), позволяющая обеспечить роботу целевое движение (с нулевыми начальными и конечными линейными скоростями) за отведенное время с безударным обходом двух статичных препятствий. При этом препятствия (как и сам робот) расположены на горизонтальной плоскости на незначительном удалении друг от друга.

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

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

**PLANNING THE MOVEMENT OF THE ROBOT ALONG A HORIZONTAL  
PLANE BYPASSING TWO STATIC OBSTACLES LOCATED  
AT A SMALL DISTANCE FROM EACH OTHER**

**Volgograd State Technical University**

The article considers the modification of the method of automatic motion planning of a mobile robot ( $VC/APF+BC_{\tau}^I$ ), which allows the robot to provide targeted movement (with zero initial and final linear velocities) in the allotted time with a shock-free bypass of two static obstacles. In this case, the obstacles (as well as the robot itself) are located on a horizontal plane at a small distance from each other.

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

**Введение**

При автоматическом планировании движения мобильного робота в сложно структурированной среде, одной из задач робота является задача его маневрирования среди нескольких препятствий. Нередко расстояние между препятствиями незначительно превышает размер самого робота. То есть роботу необходимо совместно уклоняться от столкновения с двумя и более препятствиями. Уклонение робота от первого препятствия может привести к необходимости оперативной корректировки траектории (законов движения) робота для исключения столкновения со вторым препятствием.

Решения подобных задач рассматривались в различных работах, например [1, 2]. Многие опубликованные решения имеют следующие особенности (ограничивающие их практическое применение): требуется заранее подготовленная и обработанная карта оперативного пространства робота; достижение целевой точки носит вероятностный характер (время движения робота не фиксировано); продуцируемая

траектория робота имеет вид ломанной кривой (требуется ее сглаживание); методы исходно не синтезируют законы перемещения мобильного робота (необходимые для физической реализации его движения).

В работе [3] рассматривалось решение задачи обхода двух статичных препятствий ранее предложенным методом  $VC/APF+BC_{\tau}^I$  [4]. Данный метод не имеет вышеописанных особенностей, снижающих уровень его практической применимости. При расстоянии между двумя статичными препятствиями много большем размера робота, робот безударно обходит препятствия и приходит в финальную точку за отведенное время. Однако, если расстояние между препятствиями сопоставимо с размерами робота, то могут возникнуть случаи, когда траектория центра масс мобильного робота пересекает второе препятствие (при уклонении от первого).

Таким образом, возникает необходимость в модификации исходного метода автоматического планирования движения  $VC/APF+BC_{\tau}^I$ , позволяющей оперативно корректировать дви-

жение мобильного робота при близком расположении препятствий (расстояние между габаритными окружностями препятствий незначительно превышает размер робота).

### 1. Постановка задачи

Требуется модифицировать исходный алгоритм планирования движения мобильного робота (VC/APF+BC<sub>τ</sub><sup>1</sup>) для обхода двух препятствий, расстояние  $d$  между которыми незначи-

тельно больше размера робота ( $d > 2R$ , где  $R$  – радиус габаритной окружности робота). Движение мобильного робота происходит из начальной точки  $O$  в конечную точку  $F$ , в которую необходимо попасть за отведенное время  $\tau$  с заданными начальными и конечными линейными координатами и (нулевыми) скоростями центра масс робота:  $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0; x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau$  (рис. 1). Робот обладает массой  $m$ .

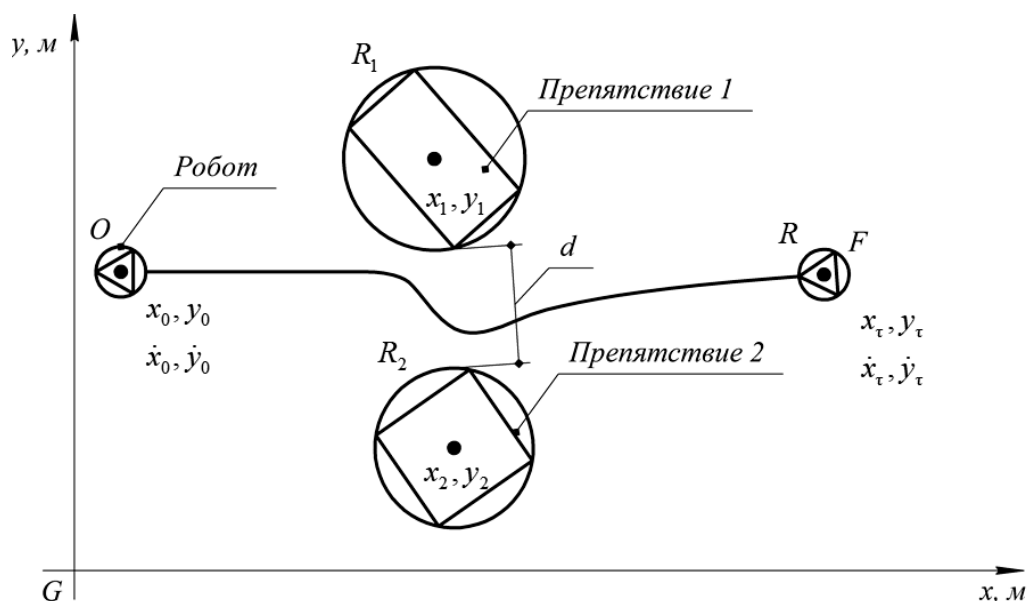


Рис. 1. Постановка задачи

### 2. Решение

Алгоритм автоматического планирования движения робота (реализуемый при совместном учете двух препятствий и исходных данных) можно описать следующей последовательностью действий:

1. Производится проверка аналитической траектории центра масс (ЦМ) мобильного робота (МР) на пересечение внутренних границ (с радиусами  $r_{\min_1}, r_{\min_2}$ ) силовых полей препятствий (границ опасных зон) [4].

1.1. Если траектория ЦМ МР пересекает внутреннюю границу поля первого препятствия  $r_{\min_1}$ , то запускается режим уклонения робота от первого препятствия [4]. Поле второго препятствия выключено и не воздействует на робот. Во время движения мобильного робота производится проверка виртуальной аналитической траектории на пересечения с границами опасных зон препятствий на каждом временном шаге.

1.2. Если траектория ЦМ МР не пересекает внутреннюю границу поля (границу опасной

зоны) первого препятствия  $r_{\min_1}$ , но пересекает внутреннюю границу поля второго препятствия  $r_{\min_2}$ , то производится:

1.2.1. перерасчет радиуса внешней границы силового поля второго препятствия по формуле (1):

$$r_{0_2} = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}; \quad (1)$$

где  $x, y$  – координаты центра масс робота в текущий момент времени;  $x_2, y_2$  – координаты центра второго препятствия.

1.2.2. проверка условия (2) расчета неотрицательной жесткости виртуальной пружины второго препятствия [5] для его учета в процессе движения робота:

$$\sin^2 \gamma \Big|_{r=r_{0_2}} \leq \frac{r_{\min_2}^2}{r_{0_2}^2} \quad (2)$$

где  $\gamma$  – угол между вектором скорости на внешней границе поля второго препятствия и линией, соединяющей центр масс робота и центр второго препятствия.

1.2.2.1. Если условие (2) не выполняется, то реализуется движение ЦМ МР по аналитической траектории без маневрирования (поля обоих препятствий неактивны) и выполняются действия 1.2.1. и 1.2.2. повторно.

1.2.2.2. Если условие (2) выполняется, то реализуется движение робота в режиме уклонения от второго препятствия. Поле первого препятствия выключено, поле второго препятствия включено.

1.2.3. Происходит возврат к пункту 1 алгоритма.

1.3. Если аналитическая траектория ЦМ МР не пересекает границ полей (опасных зон) препятствий с радиусами  $r_{\min_1}, r_{\min_2}$ , то производится движение ЦМ МР по аналитическим законам без маневрирования.

В общем виде блок-схема рассматриваемого алгоритма планирования движения робота (при учете в движении робота двух препятствий) представлена на рис. 2.

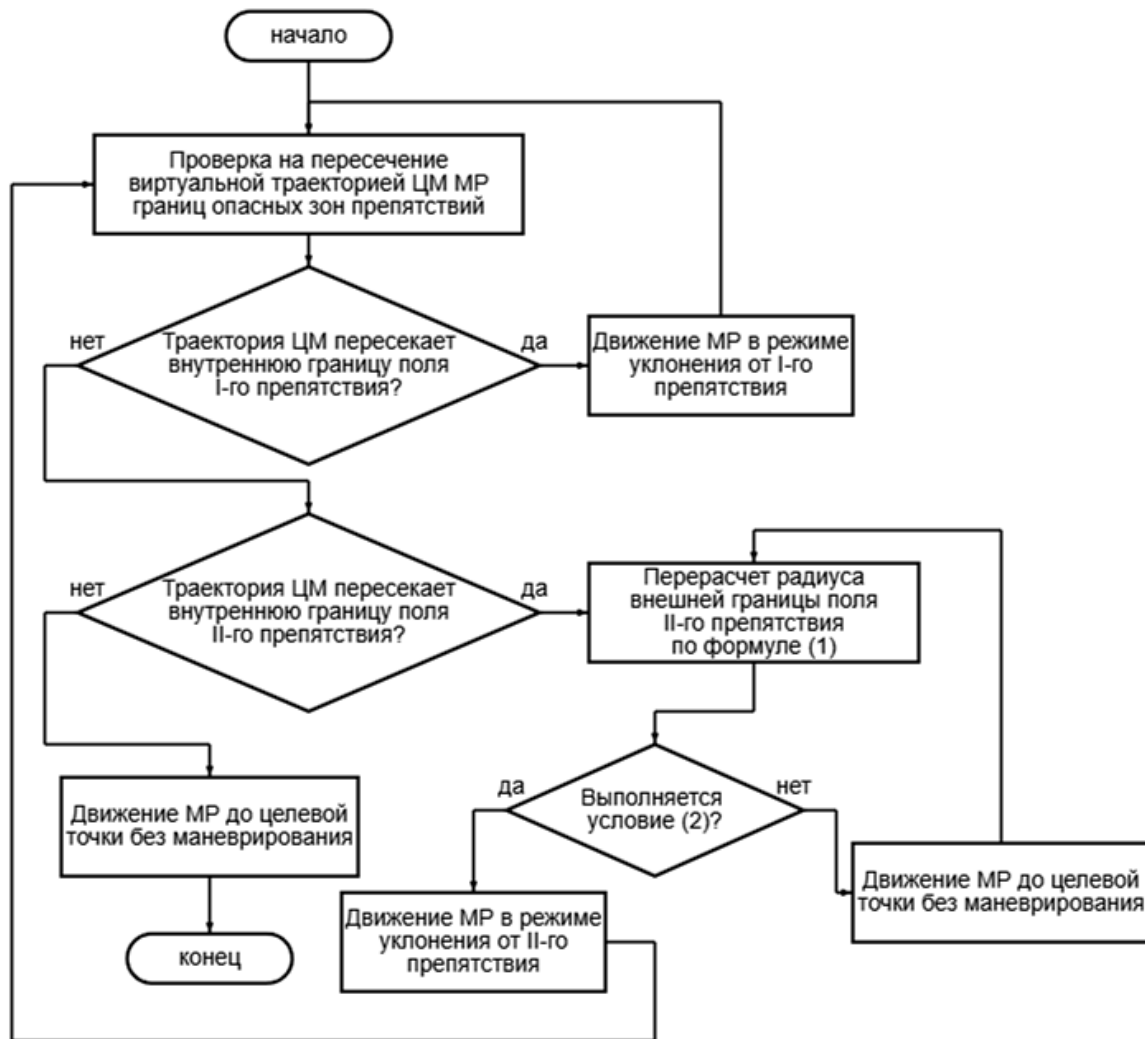
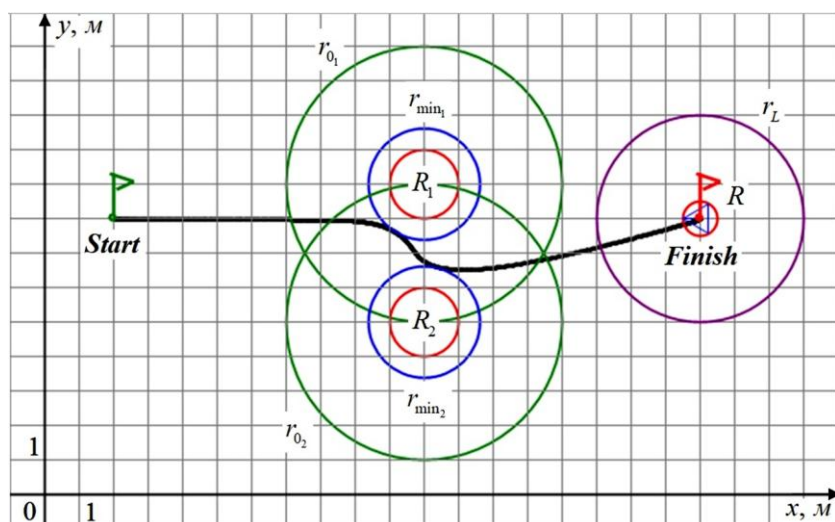


Рис. 2. Блок-схема рассматриваемого алгоритма планирования движения

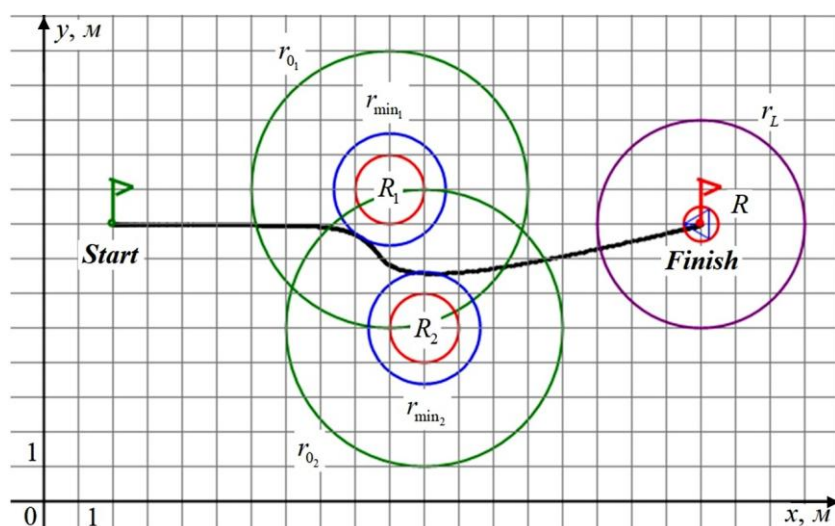
### 3. Компьютерное моделирование

Для серии численных экспериментов (рис. 3) были приняты постоянными следующие параметры: масса робота  $m = 1$  кг; радиус окружности, описанной вокруг робота  $R = 0,5$  м; дальность видимости сенсора робота  $r_L = 3$  м; размеры габаритных окружностей препятствий  $R_1 = R_2 = 1$  м; заданное оперативное время дви-

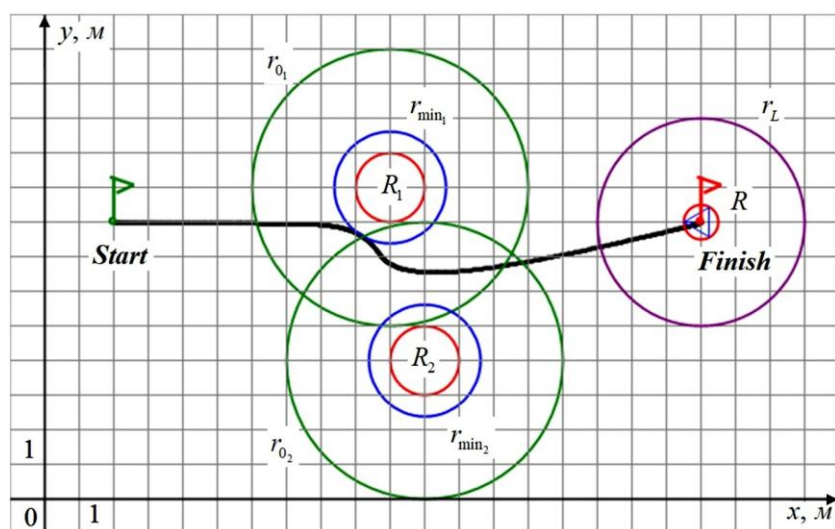
жения робота  $\tau = 10$  с, временной шаг расчета кинематических характеристик робота (ускорений, скоростей и координат)  $dt = 0,01$  с. Используется теоретическое допущение, что сканирующее устройство мобильного робота получает необходимую информацию об окружающем пространстве в полном объеме и мгновенно.



$a - x_0 = 2 \text{ м}; y_0 = y_\tau = 8 \text{ м}; x_\tau = 19 \text{ м}; x_1 = x_2 = 11 \text{ м}; y_1 = 9 \text{ м}; y_2 = 5 \text{ м}$



$б - x_0 = 2 \text{ м}; y_0 = y_\tau = 8 \text{ м}; x_\tau = 19 \text{ м}; x_1 = 10 \text{ м}; x_2 = 11 \text{ м}; y_1 = 9 \text{ м}; y_2 = 5 \text{ м}$



$в - x_0 = 2 \text{ м}; y_0 = y_\tau = 8 \text{ м}; x_\tau = 19 \text{ м}; x_1 = 10 \text{ м}; x_2 = 11 \text{ м}; y_1 = 9 \text{ м}; y_2 = 4 \text{ м}$

Рис. 3. Результаты численного тестирования алгоритма с нулевыми начальными и конечными линейными скоростями центра масс робота:  
«Start» – начальное положение ЦМ МР, «Finish» – конечное (целевое) положение ЦМ МР (см. также с. 35)



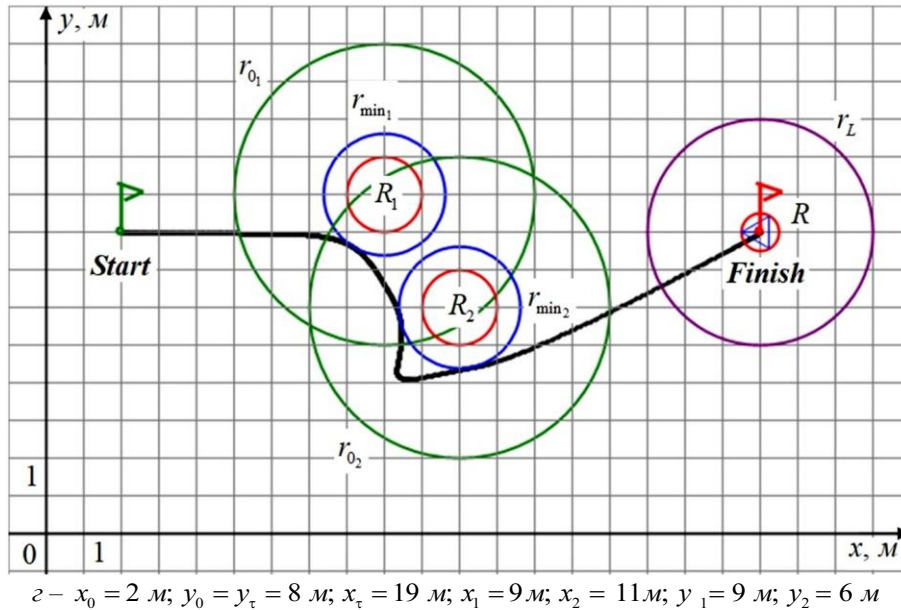


Рис. 3. Окончание

### Заключение

Рис. 3, а и 3, б иллюстрируют поочередный обход роботом двух статичных препятствий при последовательном включении (отключении) центрально-симметричных отталкивающих силовых полей препятствий. На рис. 3, в представлен случай преодоления роботом препятствий, когда проверка (в процессе движения робота в силовом поле первого препятствия) установила возможность перехода в режим движения ЦМ МР к целевой точке по оптимальным аналитическим законам движения (без соударения робота с препятствиями). Движение робота из начального в конечное положение с совместным обходом двух близкорасположенных препятствий (рис. 3, г) возможно также при последовательном включении поля первого препятствия, его отключении с активацией поля второго препятствия и переходе к движению ЦМ МР по аналитическим законам (поле второго препятствия отключается).

Анализ полученных результатов показывает, что рассмотренная модификация алгоритма автоматического планирования движения мобильного робота в общем случае позволяет роботу обойти два статичных препятствия, расположенных на незначительном удалении друг от друга, и прийти в финальное положение за за-

данное время при нулевых начальных и конечных скоростях центра масс мобильного робота.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фархуд, А. К. Управление мобильным роботом с применением нейронной сети для планирования движения в некартографированной среде с препятствиями / А. К. Фархуд // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6 (223). – С. 99–114.
2. Pshikhopov, V. Trajectory planning algorithms in two-dimensional environment with obstacles / V. Pshikhopov, M. Medvedev, V. Kostjukov, F. Houssein, A. Khadim // Informatics and automation. Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН. – 2022. – Vol. 21, № 3. – С. 459–492.
3. Кошман, А. М. Планирование движения робота по горизонтальной плоскости с обходом двух статичных препятствий методом  $VC/APF+BC_{\tau}^1$  / А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (299) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2025. – С. 49–53.
4. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ( $VC/APF+BC_{\tau}^1$ ). Ч. 1. Теория / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 42–48.
5. Леонард, А. В. Особенности планирования движения наземного робота с обходом стационарного препятствия на основе подхода  $VC/APF+BC_{\tau}^1$  / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(280) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 33–40.

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-36-40

*А. В. Нелюбова, В. В. Николаева***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОГО ПРИВОДА\*****Волгоградский государственный технический университет**

mqdschen@yandex.ru, nikolaeva.lera12@gmail.com

В статье рассматривается линейный привод гибридного манипулятора на основе трипода с дополнительной пассивной связью. Экспериментально определена статическая характеристика линейного привода с электродвигателем постоянного тока. В ходе эксперимента определена скорость движения штока линейного привода при различных внешних нагрузках управляющих напряжений. Получены экспериментальные значения коэффициентов, характеризующих внутренние свойства системы. Составлена диаграмма «скорость–усилие» линейного привода при различных напряжениях.

*Ключевые слова:* гибридный манипулятор, линейный привод, статическая характеристика.

*A. V. Nelyubova, V. V. Nikolaeva***EXPERIMENTAL DETERMINATION  
OF STATIC CHARACTERISTICS OF THE LINEAR ACTUATOR****Volgograd State Technical University**

The paper research the linear drive of a hybrid manipulator based on a tripod with additional passive link. The static characteristic of a linear actuator has been experimentally determined. During the experiment, the speed of movement of the linear actuator rod under various loads was determined. Experimental values of coefficients characterizing the internal properties of the system have been obtained. The «speed-force» diagram of a linear actuator at various voltages has been compiled.

*Keywords:* hybrid manipulator, linear actuator, static characteristic.

**Введение**

При динамическом анализе манипуляторов обычно решают две задачи. Первая задача динамики заключается в определении движущих сил и моментов, необходимых для выполнения программного движения, и динамических нагрузок в кинематических парах [1]. Определение динамических нагрузок, действующих на звенья механизмов, используется для оценки жесткости системы. Вторая задача динамики заключается в определении динамической точности, т. е. расчет отклонений законов движений от программных. Динамика исполнительных приводов механической системы манипуляторов оказывает большое влияние на точность реализации про-

граммных перемещений. Для динамического анализа манипуляторов необходимо определить свойства приводов, которые описываются характеристиками двигателей.

Манипулятор [2] обладает четырьмя степенями свободы, движение выходного звена описывается обобщенными координатами  $q_k(t)$ :  $L(t)$ ,  $\psi(t)$ ,  $\delta(t)$ ,  $\varphi(t)$ . Длина  $L(t)$  характеризует переменную длину полой трубы. Углами  $\psi(t)$ ,  $\delta(t)$  задается поворот подвижных осей относительно неподвижных осей. Угол поворота  $\varphi(t)$  характеризует угол наклона поворотного основания.

Дифференциальные уравнения движения манипулятора имеют вид [3]:

$$\begin{aligned} & \left(0,172 - \frac{0,14}{\pi} \varphi\right) \ddot{\varphi} - \frac{0,07}{\pi} \dot{\varphi}^2 = \frac{2}{3} m_{bc} g OA \sin \varphi - \frac{OD \cdot OA \cos \varphi}{l_4} F_4 - \\ & - \frac{OA}{l_1} [(DK - L \cos \psi_5 + r \sin \psi_5) \sin \varphi + (OD + L \sin \psi_5 \cos \delta_5 + r \cos \psi_5 \cos \delta_5) \cos \varphi] F_1 + \\ & + m_{42} \frac{OA OD \cos \varphi}{\sqrt{OA^2 + OD^2 - 2OA OD \sin \varphi}} \cdot \frac{\sqrt{l_4^2 - (OD - OA \sin \varphi)^2}}{l_4} g - \\ & - \left[ m_{41} l_{c1} + m_{42} (\sqrt{OA^2 + OD^2 - 2OA OD \sin \varphi} - l_{40}) \right] \cdot \frac{(OD - OA \sin \varphi) OA \cos \varphi}{l_4 \sqrt{l_4^2 - (OD - OA \sin \varphi)^2}} g; \end{aligned} \quad (1)$$

© Нелюбова А. В., Николаева В. В., 2025.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ (из средств программы развития «Приоритет 2030» по соглашению № 075-15-2025-063) в рамках научного проекта №25/639-24.

$$m_5 \ddot{L} - m_5 (L - L_0 + z_{c05}) (\dot{\delta}^2 \sin^2 \psi + \dot{\psi}^2) = -m_5 g \cos \psi +$$

$$+ \frac{L + OD \sin \psi \cos \delta - OA \sin \varphi \sin \psi \cos \delta - DK \cos \psi - OA \cos \psi \cos \varphi}{l_1} F_1 +$$

$$+ \frac{L - (OB \sin \delta - OD \cos \delta) \sin \psi - DK \cos \psi}{l_2} F_2 + \frac{L + (OC \sin \delta + OD \cos \delta) \sin \psi - DK \cos \psi}{l_3} F_3;$$

$$\left[ I_5 + m_5 (L - L_0 + z_{c05})^2 \right] \ddot{\psi}_5 + 2m_5 (L - L_0 + z_{c05}) \dot{L} \dot{\psi}_5 - \left[ I_5 + m_5 (L - L_0 + z_{c05})^2 \right] \dot{\delta}_5^2 \sin \psi_5 \cos \psi_5 =$$

$$= \frac{(OD - OA \sin \varphi)(L \cos \psi \cos \delta - r \sin \psi \cos \delta) + (DK + OA \cos \varphi)(r \cos \psi + L \sin \psi)}{l_1} F_1 +$$

$$+ \frac{-(OB \sin \delta - OD \cos \delta) \cdot (r \sin \alpha \sin \psi + L \cos \psi) + DK (L \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi)}{l_2} F_2 +$$

$$+ \frac{(OC \sin \delta + OD \cos \delta)(L \cos \psi + r \sin \alpha \sin \psi) + DK (L \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi)}{l_3} F_3 + m_5 g (L - L_0) \sin \psi;$$

$$(\ddot{\delta}_5 \sin^2 \psi_5 + 2\dot{\delta}_5 \dot{\psi}_5 \sin \psi_5 \cos \psi_5) \left[ m_5 (L - L_0 + z_{c05})^2 + I_5 \right] +$$

$$+ 2\dot{\delta}_5 \sin^2 \psi_5 m_5 (L - L_0 + z_{c05}) \dot{L} = \frac{(OD - OA \sin \varphi)(-L \sin \psi \sin \delta - r \cos \psi \sin \delta)}{l_1} F_1 +$$

$$+ \frac{(OB \cos \delta + OD \sin \delta)(r \sin \alpha \cos \psi - L \sin \psi) + r \cos \alpha (OB \sin \delta - OD \cos \delta)}{l_2} F_2 +$$

$$+ \frac{(OC \cos \delta - OD \sin \delta)(L \sin \psi - r \sin \alpha \cos \psi) + r \cos \alpha (OD \cdot \cos \delta + OC \sin \delta)}{l_3} F_3.$$

Для динамического анализа манипулятора и определения динамических ошибок необходимо знать рабочие характеристики электромеханического привода, которые характеризуют его динамические свойства.

При небольших скоростях движения достаточно определить статическую характеристику привода. Статическая характеристика учитывает зависимость скорости выходного звена от обобщенной силы.

Статические характеристики электромеханических приводов (рис. 1) могут быть представлены в форме:

$$F_j = a u_j(t) - b \dot{l}_j, \quad j = 1 \div 4, \quad (5)$$

где  $a, b$  – коэффициенты, зависящие от параметров электродвигателя и параметров механической передачи;  $u_j(t), \dot{l}_j$  – управляющие напряжения в обмотке возбуждения электродвигателя и линейная скорость штока винтовой передачи.

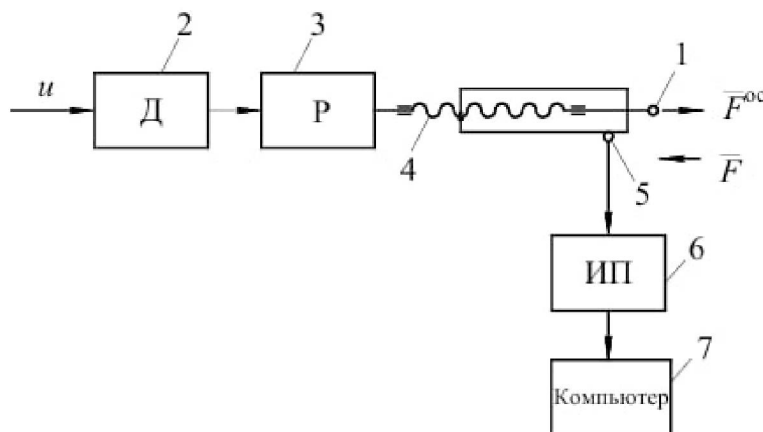


Рис. 1. Структурная схема приводного механизма исполнительного звена манипулятора:  
1 – шток; 2 – электродвигатель; 3 – двухступенчатый цилиндрический редуктор; 4 – самотормозящая винтовая передача;  
5 – датчик перемещения; 6 – измерительный преобразователь; 7 – компьютер

Уравнения (1)–(4) и (5) образуют полную систему уравнений движения манипулятора. Интегрируя эти уравнения, можно определить законы движения и движущие силы при заданных программных управлениях  $u_i(t)$  и заданных начальных условиях

$$L(0) = L_0, \psi(0) = \psi_0, \delta(0) = \delta_0, \varphi(0) = \varphi_0, \\ \dot{L}(0) = v_0, \dot{\psi}(0) = \omega_\psi(0), \dot{\delta}(0) = \omega_\delta(0), \dot{\varphi}(0) = \omega_\varphi(0).$$

#### Определение статической характеристики линейного привода

Исполнительное звено манипулятора состоит из электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением, двухступенчатого цилиндрического редуктора и винтовой передачи (рис. 1) [4]. Механизм передачи движения от двигателя к перемещаемой массе считается безынерционным. В качестве обобщенной координаты привода выбираем угол поворота  $\alpha_{1j}$  выходного вала двигателя [5].

Статическая характеристика двигателя постоянного тока с независимым возбуждением имеет вид:

$$M_{1j} = ru_j(t) - s\omega_{1j}, \quad (6)$$

где  $M_{1j}$  – момент на валу двигателя;  $r, s$  – коэффициенты, зависящие от параметров двигателя;  $u_j(t)$  – управляющее напряжение в обмотке возбуждения;  $\omega_{1j} = \dot{\alpha}_{1j}$  – угловая скорость на валу двигателя.

Структурная схема приводного механизма исполнительного звена манипулятора представлена на рис. 1.  $F$  – осевая движущая сила на штоке, определяемая нагрузкой при работе манипулятора.

Уравнение, связывающее момент  $M_{1j}$  на ва-

лу электродвигателя и на выходном валу редуктора  $M_{2j}$ , имеет вид

$$M_{2j} = M_{1j} \cdot i \cdot \eta, \quad (7)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия редуктора;  $i$  – передаточное отношение редуктора равно  $i = \frac{\omega_{1j}}{\omega_{2j}}$ ,  $\omega_{2j}$  – угловая скорость винта штока.

Момент на ведущем вращающемся винте связан с осевой силой, действующей на гайку со штоком, выражением [5]:

$$M_{2j} = 0,7F_j \frac{d}{2} \cdot \operatorname{tg}(\beta + \rho), \quad (8)$$

где  $F_j$  – усилие на штоке, определяемое нагрузкой на шток;  $\beta, \rho$  – угол подъема винтовой линии и приведенный угол трения, соответственно;  $d$  – средний диаметр резьбы ведущего звена.

Угловая скорость винта связана с линейной скоростью штока  $\dot{l}_j$  соотношением:

$$\omega_{2j} = \frac{2\pi}{pn} \dot{l}_j, \quad (9)$$

где  $p$  – шаг резьбы винтовой пары;  $n$  – число заходов резьбы винтовой пары.

Усилие в исполнительных звеньях манипулятора определяется из выражений (6)–(9)

$$F_j = \frac{r\eta}{0,35d \cdot \operatorname{tg}(\beta + \rho)} u_j - \frac{2\pi s}{0,35d \cdot \operatorname{tg}(\beta + \rho)} \dot{l}_j \quad (10)$$

#### Экспериментальное определение статической характеристики линейного привода

В ходе эксперимента рассматривается линейный актуатор LA-T6 с рабочим ходом 400 мм. Движение штока совершается за счет силы  $F$  в приводе, противодействует движению сила трения  $F_{\text{тр}}$ , на груз действует сила тяжести  $mg$  (рис. 2).

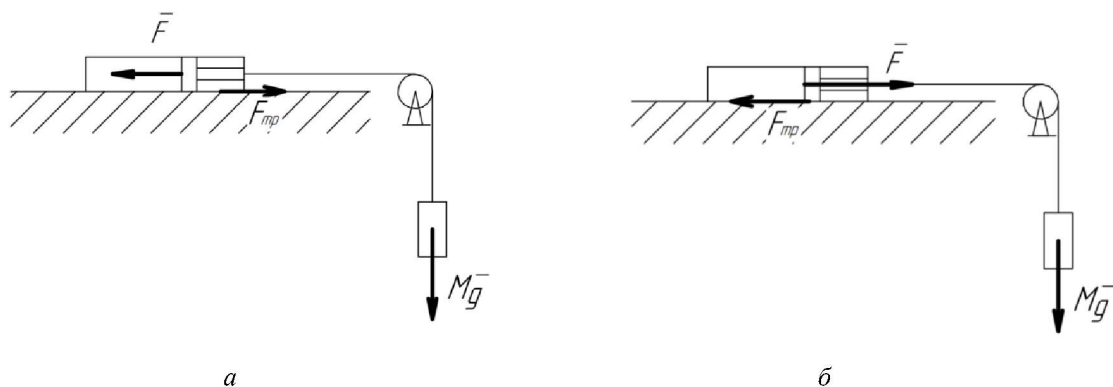


Рис. 2. Силы системы при втягивании (а) и выдвигании (б) штока

Принимаем, что груз движется равномерно, тогда сумма сил в проекции на горизонтальную ось равна нулю:

$$F = mg + F_{np}; \quad (11)$$

$$F = F_{np} - mg, \quad (12)$$

где  $F$  – усилие привода;  $M$  – масса груза;  $F_{тр}$  – сила трения в передаче привода.

Уравнение (11) справедливо для случая втягивания штока привода, а уравнение (12) для случая его выдвигания.

Сила  $F$  определяется выражением (10). Значения скорости движения штока получены экспериментальным путем при нагружении приво-

да грузами массой от 2,5 кг до 20 кг. Управляющая программа контроллера фиксирует значения положения штока и времени при заданном напряжении  $u$ .

Экспериментальные значения скорости используем для вычисления коэффициентов  $a$  и  $b$  (см. таблицу) из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} F_1 = aU - bv_1 \\ F_2 = aU - bv_2 \end{cases}, \quad (13)$$

Из (10)

$$a = \frac{r\dot{\eta}}{0,35d \cdot \operatorname{tg}(\beta + \rho)}, \quad b = \frac{2\pi s}{0,35d \cdot \operatorname{tg}(\beta + \rho)}.$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  для разных нагрузок

| $F$ , Н | 0     | 25   | 50    | 75   | 100   | 125   | 150   | 175   | 200   |
|---------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $a$     | 18,75 | 27   | 14,06 | 7,81 | 11,25 | 11,25 | 13,54 | 17,71 | 11,25 |
| $b$     | 8,33  | 12,5 | 6,25  | 3,13 | 5     | 5     | 6,25  | 8,33  | 5     |

Так как  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты, примем их значения равными среднему значению. Тогда  $a = 12,5$ ,  $b = 6,6$ .

Диаграмма «скорость–усилие» (рис. 3) актуатора показывает зависимость между скоростью движения штока и осевым усилием.

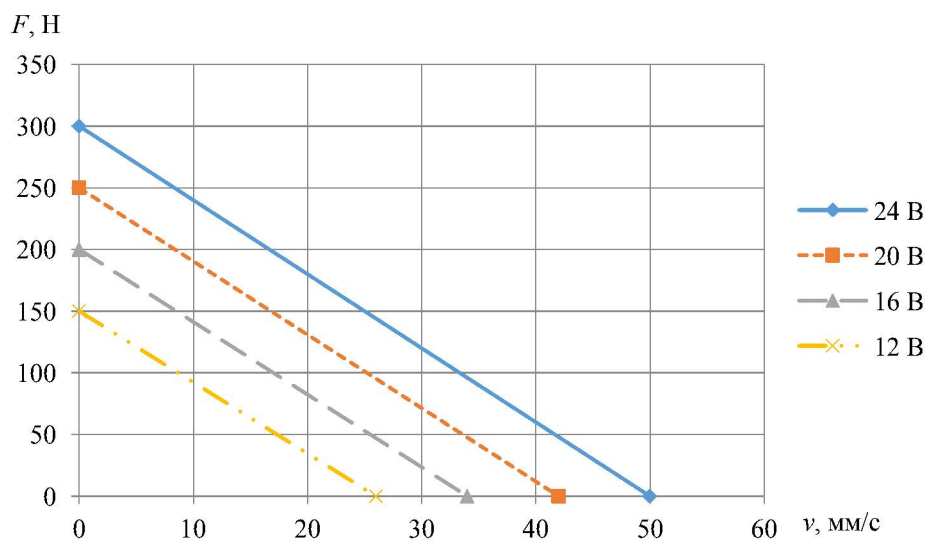


Рис. 3. Диаграмма «скорость–усилие» при различных напряжениях на обмотке возбуждения электродвигателя

Если электродвигатели имеют жесткие характеристики (рис. 3), т. е. нагрузка слабо влияет на закон перемещения, то отклонения от программных движений (динамические ошибки) небольшие

$$\psi_k(t) = q_k(t) - q_{кп}(t), \quad k = 1 \div 4. \quad (14)$$

Подставляя программные законы изменения обобщенных координат  $q_{кп}(t)$  в уравнения (1)–

(4), а затем найденные значения программных усилий  $F_{jп}(t)$  в (10), найдем:

$$u_{jп}(t) = i_{jп} \frac{2\pi s}{r\dot{\eta}} + F_{jп} \frac{0,35d \cdot \operatorname{tg}(\beta + \rho)}{r\dot{\eta}}. \quad (15)$$

Если система управления формирует управляющие напряжения по полученным законам (15), то механическая система манипулятора должна точно реализовать программные пере-



мещения исполнительных звеньев, а динамические ошибки будут обращаться в нуль.

Значения программных усилий  $F_{пл}(t)$  при реализации движения выходного звена манипулятора из начальной точки  $M_n$  ( $x_{Mn} = 0$  мм,  $y_{Mn} = 500$  мм,  $z_{Mn} = 400$  мм) в конечную точку  $M_k$  ( $x_{Mk} = 100$  мм,  $y_{Mk} = 700$  мм,  $z_{Mk} = 500$  мм) получены в работе [3].

Траектория движения выходного звена задана по закону:

$$S(t) = S_e \left( 10 - 15 \frac{t}{\tau} + 6 \frac{t^2}{\tau^2} \right) \frac{t^3}{\tau^3}, \quad (16)$$

где  $S_e$  – длина траектории;  $\tau$  – конечное время перемещения выходного звена манипулятора. Скорости и ускорения точки  $M$  в начальный и конечный моменты времени равны нулю.

С учетом выражения (15) найдем значения управляющих напряжений, обеспечивающих перемещения выходного звена из начальной точки в конечную за время  $\tau = 10$  с.

На рис. 4 представлены графики изменения управляющих напряжений.

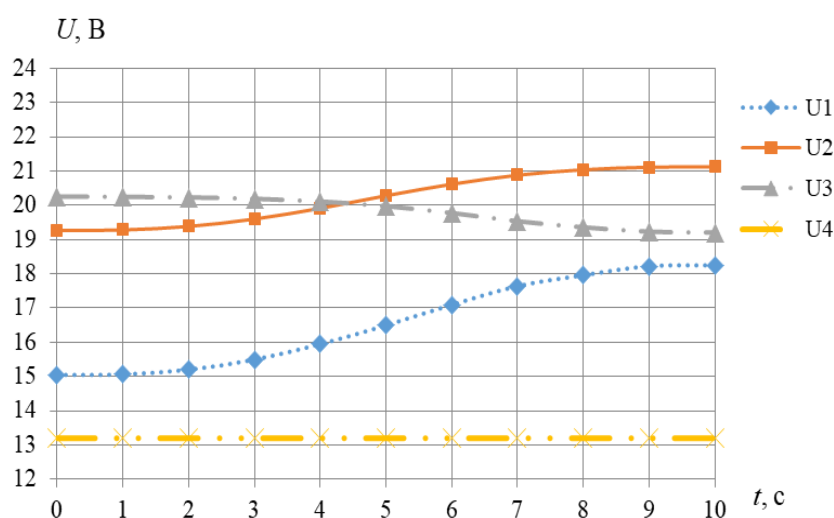


Рис. 4. Графики изменения управляющих напряжений при перемещении выходного звена из начальной точки в конечную

### Заключение

Полученные значения управляющих напряжений необходимы при формировании системы управления манипулятором для обеспечения программных перемещений исполнительных звеньев. Чаще всего управление манипулятором осуществляется с помощью обратных связей [6], в этом случае в систему управления вводятся система датчиков, измеряющих в каждый момент времени кинематические параметры движения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колковский, М. З. Основы динамики промышленных роботов / М. З. Колковский, А. В. Слоущ. – Москва: Наука, 1988. – 239 с.

2. П. м. 218886 Российская Федерация, МПК В66С 23/00 Манипулятор-трипод / В. В. Жога, А. В. Нелюбова, Н. Г. Шаронов, В. В. Чернышев; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.
3. 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. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 61–66.
4. Жога, В. В. Динамика и синтез управляющих сигналов манипулятора параллельно-последовательной структуры / В. В. Жога, В. В. Дяшкин-Титов, Н. С. Воробьева, А. В. Дяшкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 8 (749). – С. 3–12.
5. Юревич, Е. И. Основы робототехники: учеб. пособие. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 304 с.
6. Крутько, П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: Нелинейные модели / П. Д. Крутько. – Москва: Наука, 1988. – 326 с.

УДК 621.865.8  
DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-41-44

*И. А. Несмиянов<sup>1</sup>, М. Е. Николаев<sup>2</sup>, В. А. Перфилов<sup>2</sup>, Д. А. Ляшенко<sup>2</sup>*

**БАЗА ЗНАНИЙ ЦИКЛОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ  
НА ПРИМЕРЕ ПОГРУЗКИ ШТУЧНЫХ ГРУЗОВ**

<sup>1</sup> Волгоградский государственный аграрный университет

<sup>2</sup> Волгоградский государственный технический университет

ivan\_nesmiyanov@mail.ru; mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru;

vladimirperfilov@mail.ru; dmitiry.lyashenko@yandex.ru

Рассмотрена база знаний циклов технологических погрузочно-разгрузочных операций в сельском производстве, выполняемых манипуляторами, их лингвистическая аппроксимация на примере погрузки штучных грузов. С целью выбора планирования траекторий перемещения захватываемых грузов, с учетом минимизации энергозатрат.

*Ключевые слова:* планирование траекторий, манипулятор, погрузчик, грузозахватный орган.

*I. A. Nesmeyanov<sup>1</sup>, M. E. Nikolaev<sup>2</sup>, V. A. Perfilov<sup>2</sup>, D. A. Lyashenko<sup>2</sup>*

**KNOWLEDGE BASE OF CYCLES OF TECHNOLOGICAL LOADING  
AND UNLOADING OPERATIONS ON THE EXAMPLE  
OF LOADING OF INDIVIDUAL CARGOES**

<sup>1</sup> Volgograd State Agrarian University

<sup>2</sup> Volgograd State Technical University

The knowledge base of cycles of technological loading and unloading operations in rural production performed by manipulators, their linguistic approximation, is considered, using the example of loading individual cargoes. In order to select the planning of the trajectories of movement of captured goods, taking into account the minimization of energy consumption.

*Keywords:* trajectory planning, manipulator, loader, lifting body.

Управление манипулятором – это комплексный процесс, который включает в себя разработку и оптимизацию планирования программных движений грузозахватного органа, определяющих его положение в пространстве, а также перемещение из начальной в конечную точку по заданным траекториям.

Траектория движения захвата при выполнении технологического процесса погрузки, транспортировки штучных грузов является одним из ключевых факторов, влияющих на работу приводов механизма. Чтобы обеспечить точное позиционирование по заданной траектории, необходимо учитывать все возможные конфигурации манипулятора. Это возможно при условии отсутствия динамических и статических препятствий на пути движения грузозахватного органа.

В сельском хозяйстве технологические процессы имеют ряд характерных черт, которые могут быть непредсказуемыми. Например, начальное и конечное положения захвата манипулятора не всегда остаются неизменными.

Однако любой процесс перемещения грузозахватного органа можно описать с помощью стандартных траекторий, которые могут быть прямыми, изогнутыми и т. д. Эффективность работы манипулятора определяется выбранными траекториями. Существует несколько возможных траекторий, по которым может двигаться захват от начальной точки до конечной. Манипулятор может перемещаться по прямой, соединяющей начальную и конечную точки, а также по некоторой плавно изгибающейся линии, которая удовлетворяет определенным требованиям к ориентации захвата в начале и в конце пути. Наиболее рациональным с точки зрения позиционирования захвата, является прямолинейное перемещение. В некоторых ситуациях перемещение по прямой линии становится невозможным из-за помех, специфики конструкции манипулятора и других причин. В определенных ситуациях перемещение по прямой траектории не всегда оказывается наиболее выгодным с точки зрения энергопотребления приводами.



Это может произойти в случае, когда объекты, подлежащие захвату, оказываются на границах рабочей зоны обслуживания, или когда направление движения исполнительных механизмов изменяется. При перемещении захватываемых объектов, с которыми предстоит взаимодействовать, важно предусмотреть меры по оптимизации энергопотребления. Транспортировка упакованных грузов, а также травмируемых объектов при погрузке должна проводиться с учетом минимальных инерционных воздействий [1].

В зависимости от особенностей производственного процесса, траектория движения захвата манипулятора может быть прямой или состоять из отрезков прямых линий 13, 34, 45, 52. Возможны также траектории, представляющие собой дуги 16, 12 или 13, 34, 45, 52 более сложные комбинации. Сложную траекторию можно представить как совокупность элементарных участков, которые описываются простыми функциями. Эти участки соединяются в узловых точках.

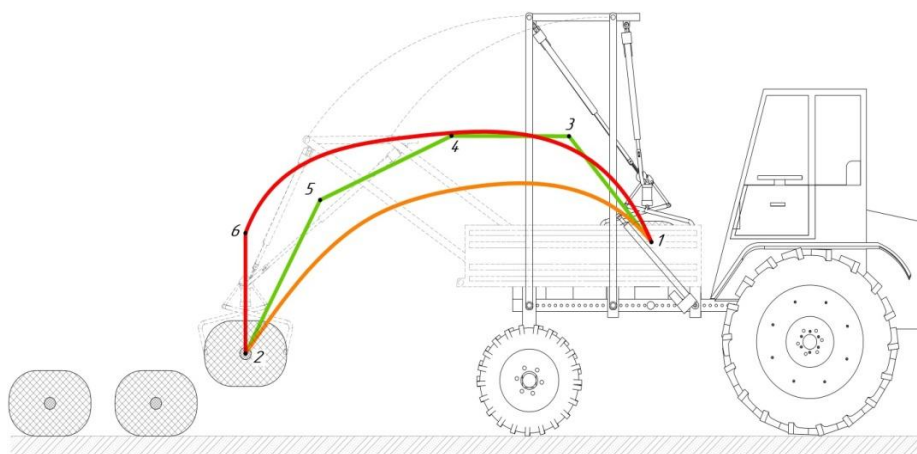


Рис. 1. Возможные кусочно-линейные траектории погрузки мешков-сеток с луком репкой манипулятором погрузчика в кузов самоходного шасси (без препятствия)

Движения грузозахватного органа манипулятора определяются особенностями производственного процесса погрузки и транспортировки грузов.

В частности, при выполнении операции по загрузке в транспортное средство с помощью погрузчика (рис. 2) возникают некоторые неопределенности:

1. Точки *A* и *J* не находятся в прямой видимости друг от друга, поэтому необходимо раз-

работать траекторию движения грузозахватного органа манипулятора, учитывая препятствия и особенности траектории.

Возможны два варианта:

1) выбрать криволинейную траекторию *ADJ* или *ABFJ*, которая позволит обойти борта транспортного средства;

2) разбить маршрут на участки и определить узловые точки, через которые будет проходить движение.

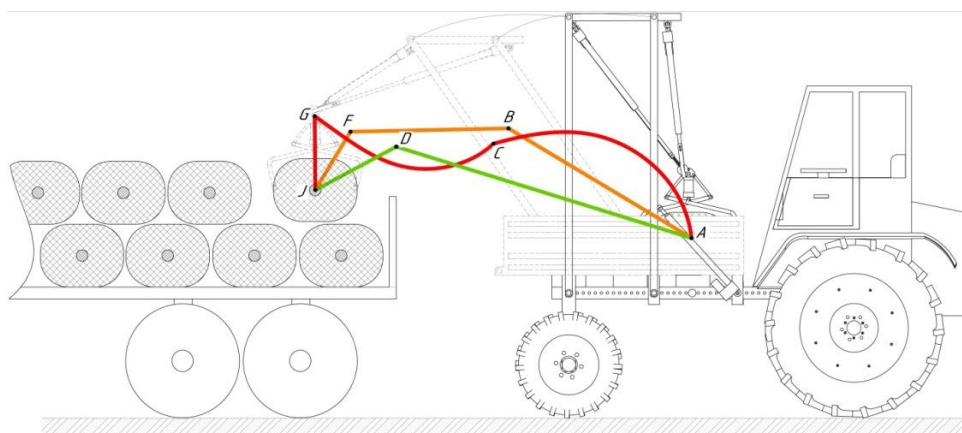


Рис. 2. Возможные траектории перемещения манипулятора погрузчика при выгрузке мешков-сеток с луком-репкой в транспортное средство

2. Процесс загрузки контейнеров в транспортное средство включает в себя последовательное заполнение грузового пространства, в результате чего окончательная точка размещения груза, становится переменной. Отсюда можно сделать вывод, что траектория, которая была выбрана изначально, может как увеличиваться, так и уменьшаться. В такой ситуации может произойти изменение и в направлении движения захвата. В качестве примера можно рассмотреть ситуацию, когда необходимо переместить груз из точки  $A$  в точку  $G$ . В этом случае траектория может быть разбита на несколько участков с узловой точкой  $C$ . Это необходимо для того, чтобы обойти препятствие – борт кузова. Таким образом, путь будет состоять из двух частей:  $AC$  и  $CG$ .

3. Точка  $A$  не всегда остается неизменной.

Наиболее эффективным маршрутом при позиционировании грузозахватного органа, является прямая траектория. При выборе такого пути задача определения местоположения сводится к перемещению манипулятора вдоль отрезка  $E_0E_1$ . Уравнение прямой в трехмерном пространстве, проходящей через точки с координатами  $x_{E1}, y_{E1}, z_{E1}$  и  $x_{E0}, y_{E0}, z_{E0}$ , можно представить в следующем виде:

$$\frac{x_E - x_{E0}}{\Delta x} = \frac{y_E - y_{E0}}{\Delta y} = \frac{z_E - z_{E0}}{\Delta z}, \quad (1)$$

где  $\Delta x = x_{E1} - x_{E0}$ ,  $\Delta y = y_{E1} - y_{E0}$ ,  $\Delta z = z_{E1} - z_{E0}$ , а  $\vec{y}(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  – вектор, который указывает направление прямой, параллельной отрезку  $E_0E_1$ .

Программное перемещение захвата по прямой линии определяет только направление движения захвата, поэтому необходимо обеспечить его перемещение по заданной траектории в соответствии с требуемым алгоритмом. Решение задачи состоит в том, чтобы для каждой обобщенной координаты выбрать один из известных законов изменения ускорения: треугольный, линейный, синусоидальный или полиномиальный. Для такого случая, принимаем, что траектория движения грузозахватного органа заранее известна [2–4].

Разработка возможных траекторий грузозахватного органа манипулятора нужна для нахождения программных перемещений. Эти данные записываются в лингвистический аппроксиматор, после чего используются для создания базы моделей и управлений (БМУ). БМУ является основой для разработки интеллектуальной системы управления, которая применяет технологию ассоциативной памяти.

Лингвистический аппроксиматор предназначен для того, чтобы заменить перемещение грузозахватного органа криволинейными траекториями. Поэтому необходимо заранее определить результаты взаимодействия различных степеней свободы в системе. Задачей подбора аппроксимирующих сплайнов, является определение количества криволинейных траекторий, которые потребуются для описания всех технологических процессов. Для этого необходимо, чтобы модели были достаточно легкими в управлении в режиме реального времени.

Исследование процессов, связанных с погрузкой и разгрузкой лука-репки, упакованного в мешки-сетки показывает, что большинство операций можно осуществить с использованием определенных движений и параметров манипулятора, а также его обобщенных координат, что позволяет реализовать технологические процессы [5–7].

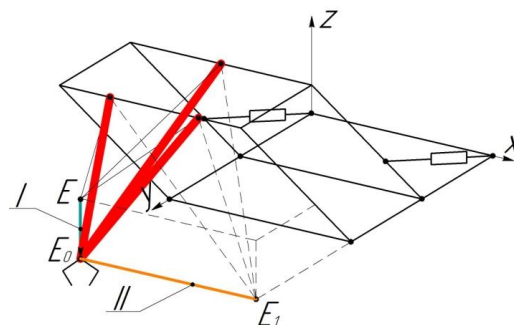


Рис. 3. Вертикальная (I) и горизонтальная (II) траектория движения выходного звена грузозахватного органа манипулятора

I – Движение захвата манипулятора по прямой траектории в вертикальном направлении.

$$\alpha = \text{const}, \psi = \text{const}, \beta = 0, x_E = \text{const}, \quad (2)$$

$$x_{E0} = \text{const}, y_E = \text{const}, y_{E0} = \text{const}.$$

II – Движение захвата манипулятора по прямой линии в горизонтальной плоскости.

$$x_E = \text{const}, x_E = \text{const}, y_E(t), z_E = \text{const}. \quad (3)$$

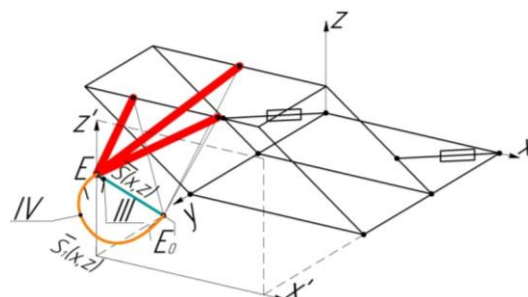


Рис. 4. Движение по прямой линии под любым углом в вертикальной плоскости (III) и перемещение по заданной траектории в вертикальной плоскости (IV) захвата манипуляционного механизма

III – Перемещение по прямой траектории в любом направлении в вертикальной плоскости с учетом заданного угла.

IV – Движение по заданной траектории в вертикальном направлении.

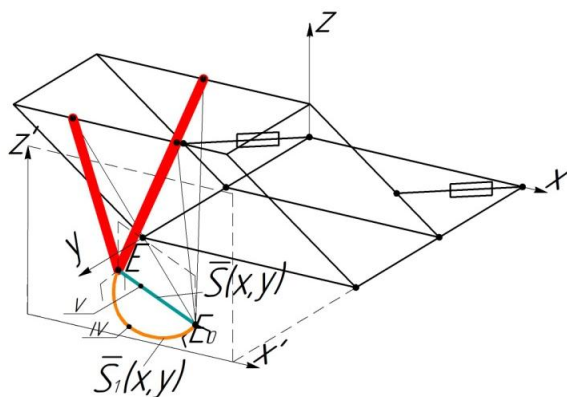


Рис. 5. Движение по прямой линии под любым углом в горизонтальной плоскости (V) и движение по заданной траектории в горизонтальной плоскости (VI)

V – Перемещение по прямой траектории под любым наклоном в горизонтальной плоскости.

VI – Движение по прямой линии в любом направлении в горизонтальной плоскости.

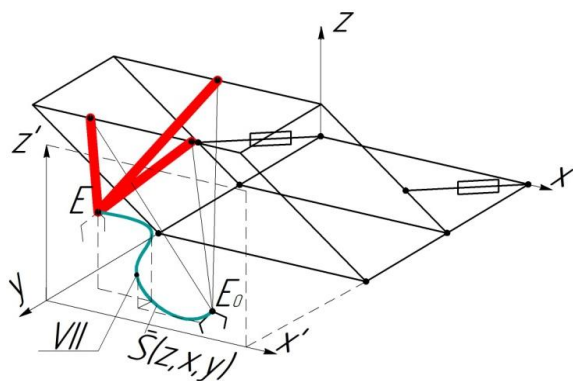


Рис. 6. Перемещение по произвольной траектории выходного звена грузозахватного механизма манипулятора (VII)

VII – Движение выходного элемента грузозахватного устройства манипулятора по любой траектории.

В результате исследований рассмотрена база знаний циклов технологических погрузочно-разгрузочных операций в сельском производстве, выполняемых манипуляторами, их лингвистическая аппроксимация на примере погрузки штучных грузов. С целью выбора планирования траекторий перемещения захватываемых грузов, с учетом минимизации энергосатрат.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юсупова, Н. И. Программное обеспечение для решения задачи извлечения деталей из контейнера с использованием технологии PMD / Н. И. Юсупова, Х. Верн, И. Р. Мамаев // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – № 1 (36). – С. 148–153.
2. Бурдаков, С. Ф. Планирование и оптимизация программных движений роботов методом конфигурационного пространства / С. Ф. Бурдаков, Н. А. Харалдин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2012. – № 3 (150). – С. 17–23.
3. Чайкин, М. О. Разработка программного комплекса для решения задачи планирования траектории при управлении движением манипуляционного механизма // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – № 2. – С. 55–66.
4. Шапоров, М. Н. Кинематический анализ механизма подъема контейнеров на погрузочно-транспортном агрегате / М. Н. Шапоров, И. С. Мартынов, М. А. Садовников, А. В. Седов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 2 (54). – С. 346–354.
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. – №747(1). – 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. – № 5. – pp.337-342.
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. – №245. – pp.235-246. – doi: 10.1007 978 981 16 3349 2\_20.

УДК 004.94+62:681

DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-45-52

*Т. В. Радченко<sup>1</sup>, А. В. Малолетов<sup>1,2</sup>***РАЗРАБОТКА VR-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ**<sup>1</sup> Университет Иннополис<sup>2</sup> Волгоградский государственный технический университет

t.radchenko@innopolis.university, a.maloletov@innopolis.ru

Разработана система удаленного управления робототехническим мобильным комплексом на базе колесной мобильной платформы Scout 2.0 и коллаборативного робота-манипулятора Dobot CR5 с помощью VR-приложения с использованием платформ ROS и Unity для визуализации и управления. Для повышения точности и эффективности управления в сложных условиях и одновременно повышения скорости работы на простых участках движения был разработан адаптивный алгоритм. Исследования показали, что робот достаточно точно воспроизводит заданные движения и способен возвращаться к траектории после коррекции положения.

*Ключевые слова:* манипулятор, виртуальная реальность, управление движением.

*T. V. Radchenko<sup>1</sup>, A. V. Maloletov<sup>1,2</sup>***DEVELOPMENT OF A VR-APPLICATION FOR REMOTE CONTROL OF A ROBOT**<sup>1</sup> Innopolis University<sup>2</sup> Volgograd State Technical University

A remote control system for a robotic mobile complex based on the Scout 2.0 wheeled mobile platform and the Dobot CR5 collaborative robot arm has been developed using a VR application with the ROS and Unity platforms for visualization and control. An adaptive algorithm has been developed to improve the accuracy and efficiency of control in difficult conditions and at the same time increase the speed of operation in simple path parts. The study has shown that the robot reproduces the specified movements quite accurately and is able to return to the trajectory after correcting the position.

*Keywords:* manipulator, virtual reality, motion control.

**Введение**

Объектом исследования является робототехнический комплекс, реализованный на базе шестикоординатного коллаборативного манипулятора, установленного на мобильной платформе. Мобильная платформа позволяет перемещать манипулятор в пространстве, расширяя таким образом его рабочую область. Исследование сосредоточено на управлении этим типом манипуляторов в условиях интеграции с симуляционной средой и виртуальной реальностью (VR). Хотя манипуляторы разнообразны по своей конструкции и способам управления, здесь рассмотрен коллаборативный робот с высокой точностью и встроенными средствами безопасности, что особенно важно для удаленной работы в ограниченных пространствах. Виртуальная реальность при этом используется главным образом как техническая инфраструктура для работы с джойстиком: основное управление манипулятором реализовано через VR-контроллеры, а мобильной платформой через клавиатуру. Сам интерфейс VR и эффект погружения не являлись самоцелью проекта – их применение обусловлено только необходимостью обеспечить работу

джойстика, который требует активной VR-среды для регистрации движений и взаимодействия с цифровым двойником робота.

Современное развитие технологий виртуальной реальности и систем удаленного управления роботами характеризуется быстрым прогрессом и широким внедрением в таких сферах, как медицина [1], промышленность и образование [2]. Существенный вклад в развитие этой технологии внесли достижения в области сенсорных технологий, сетевых коммуникаций и компьютерной графики, что позволило создавать эффективные интерфейсы для взаимодействия с удаленными объектами в реальном времени. Например, концепции и подходы к построению роботизированных манипуляторов подробно рассматриваются в работах [3] и [4], где анализируются современные решения и принципы построения подобных систем.

Первые шаги в развитии виртуальной реальности связаны с созданием устройства Sensorama Мортонем Хейлигом в 1960-х годах (рис. 1). Sensorama считается одним из ранних примеров устройств, в которых было реализовано мультисенсорное взаимодействие с вирту-



альной средой, позволившее пользователю ощутить присутствие в смоделированной ситуации. Эта концепция стала важной отправной точкой в развитии технологий виртуальной реальности [5], [6].



Рис. 1. Первое VR-устройство «Sensorama»

Современные манипуляторы становятся все более сложными и точными благодаря развитию систем управления и сенсорики. В частности, ряд технических решений, направленных на повышение надежности и точности манипуляторов для удаленной работы, рассмотрен в [7]. Рост интереса к дистанционному управлению обусловлен также внедрением манипуляторов в медицину, особенно в хирургию, где они позволяют выполнять операции с высокой степенью точности и минимальной инвазией [8]. Кроме того, усовершенствование сетевых технологий и пользовательских интерфейсов [9] открывает новые возможности для их применения в промышленности и в системах обучения операторов с использованием виртуальных сред [10].

Для реализации управления манипулятором через VR-приложение использовались Dobot CR5 с двухпальцевым захватом и мобильная платформа Scout. Управление осуществлялось с помощью Samsung HMD Odyssey и приложе-

ния на Unity, обеспечивающего связь между VR-системой и роботом. Dobot CR5 – это современный шестикоординатный коллаборативный манипулятор, предназначенный для автоматизации точных производственных и исследовательских задач (рис. 2).



Рис. 2. Dobot CR5



Рис. 3. Scout 2.0

Scout 2.0 – это универсальная мобильная платформа, предназначенная для работы в сложных условиях как внутри помещений, так и на открытом воздухе (рис. 3). Она используется для транспортировки различного оборудования, включая манипуляторы, сенсоры и вычислительные модули, и обеспечивает высокую проходимость, автономность и гибкость интеграции.

Современные двухпальцевые захваты, такие как RG2 (рис. 4) от OnRobot, используются в промышленной и коллаборативной робототехнике благодаря гибкости, большому ходу (до 110 мм) и регулируемой силе захвата (3–40 Н), что позволяет эффективно работать с объектами различной формы и массы до 2 кг [8], [10].



Рис. 4. Модель захвата RG2



Рис. 5. Samsung HMD Odyssey

Виртуальные шлемы, например Samsung HMD Odyssey (рис. 5), обеспечивают высокое разрешение, широкий угол обзора и качественный объемный звук, что делает их востребованными для VR-приложений и обучения [1], [2].

Целью представленной работы является создание и исследование системы, с помощью которой можно управлять робототехническим комплексом дистанционно, используя VR-приложение. Такая система должна позволять человеку удобно и точно управлять роботом, видя его действия в виртуальной среде.

### Реализация

Разработанная система позволяет удаленно управлять робототехническим комплексом через VR-приложение на Unity. Управление мобильной платформой осуществляется с клавиатуры, а манипулятором и захватом – с помощью VR-джойстика, что обеспечивает интуитивное и достаточно точное взаимодействие. Тестирование было проведено в симуляционной среде. Для этого была создана виртуальная модель робота, а логика управления реализована с помощью MoveIt – популярного программного пакета для планирования и исполнения движений промышленных манипуляторов в ROS. MoveIt позволяет формировать траектории, проверять их на допустимость (учитывая ограничения по кинематике и возможные столкновения), а также

автоматически оптимизировать движения конечного эффектора.

Два ключевых инструмента использовались для симуляции действий робота:

- Визуализатор RViz применялся для визуализации положений, траекторий и состояния робота – удобно для анализа и быстрой отладки работы алгоритмов управления.
- Симулятор Gazebo обеспечивал физическое моделирование среды и робота, позволяя оценить поведение системы с учетом динамики, столкновений и ограничений движения.

Такой подход позволил полностью замкнуть цикл: команды из VR-приложения попадали в симуляцию, результаты отображались в RViz (рис. 6) и Gazebo (рис. 7), что обеспечивало проверку как алгоритмов управления, так и физической адекватности системы.

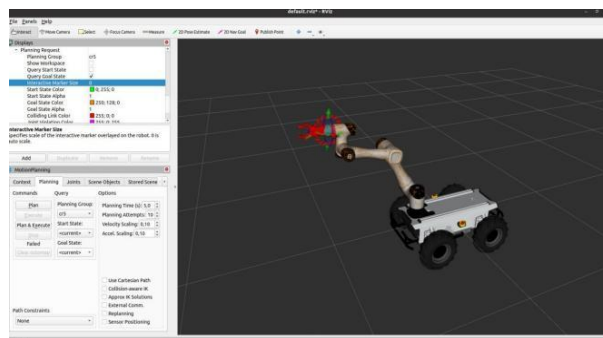


Рис. 6. Симуляция в Rviz



Рис. 7. Симуляция в Gazebo

### Графики временной задержки и отклика

Одной из основных проблем при удаленном управлении робототехническими системами является задержка между отправкой команды и ее выполнением роботом. Задержки возникают на этапах передачи данных, обработки команд и работы исполнительных механизмов, что влияет на точность и безопасность управления, особенно при динамических задачах [11], [12].

В зависимости от типа соединения задержка может составлять от единиц до сотен миллисекунд, а для промышленных и медицинских применений ведутся разработки по ее минимизации [13]. В условиях симуляции на одном персональном компьютере задержка обычно составляет 30–50 мс из-за ограничений производительности и особенностей виртуальной среды, что достаточно близко соответствует

типичной задержке во многих распределенных системах. Поэтому в рамках исследования не делалось попыток уменьшить эти задержки, а напротив задержки рассматривались как фактор неопределенности в работе системы. На рис. 8 представлены временные события, связанные с управлением движением робота. Для каждого события показана задержка в миллисекундах.

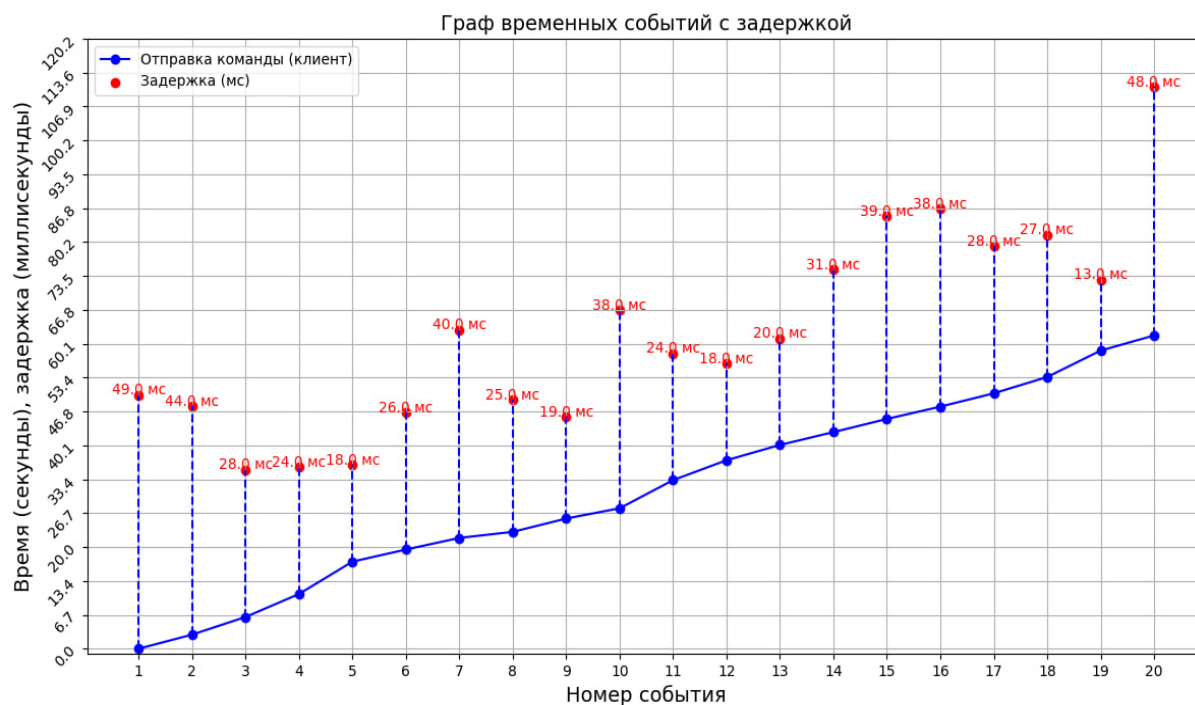


Рис. 8. Граф временных событий с задержкой

#### Движение в декартовом пространстве

В рамках работы были проведены экспериментальные исследования в симуляционной среде, направленные на проверку работы системы управления роботом. Один из экспериментов был посвящен отображению положения и ориентации конечного эффектора (в рассматриваемом случае – захвата) манипулятора и VR-джойстика в декартовом пространстве. Для этого был реализован метод, который считывает смещение джойстика и передает это смещение в систему управления роботом, который выполняет соответствующее движение. Для проверки работы метода были проведены ряд экспериментов, чтобы проанализировать,

насколько траектории конечного эффектора робота и джойстика управления похожи друг на друга. В качестве опорных объектов для траекторий джойстика управления были выбраны следующие объекты (рис. 9).

Ниже приведены изображения траекторий конечного эффектора робота и джойстика управления (рис. 10). Как видно, траектории движения робота и джойстика очень похожи, однако в каждой из них наблюдается определенная разница, связанная с частотой обновления данных. Эта разница обусловлена тем, что работа выполняется в симуляции, где существуют ограничения по точности вычислений и частоте обновлений, что непосредственно влияет на результат, отображаемый на графиках.



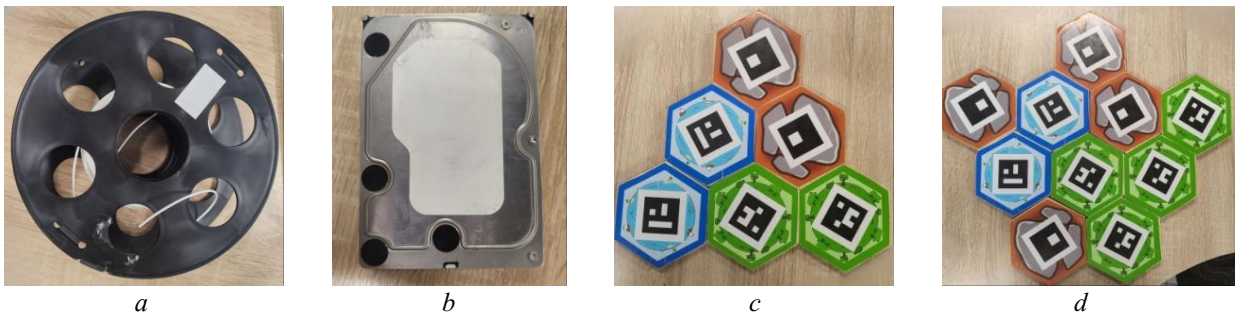


Рис. 9. Опорные объекты для траекторий джойстика управления^

*a* – объект круглой формы; *b* – объект прямоугольной формы; *c* – объект сложной треугольной формы; *d* – объект сложной формы

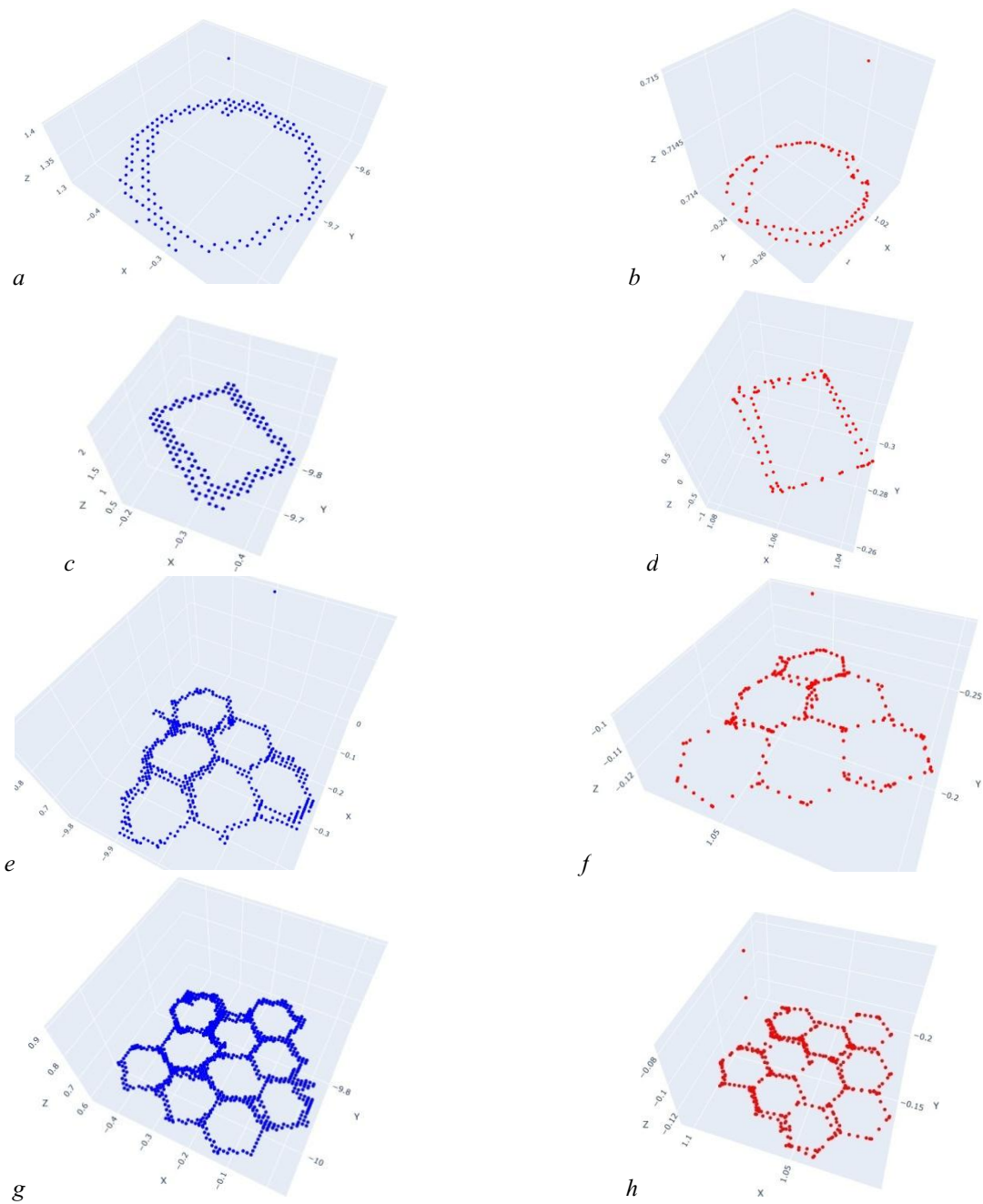


Рис. 10. Сравнение траекторий джойстика управления (*a, c, e, g*) и конечного эффектора робота (*b, d, f, h*):

*a, b* – при движении по окружности; *c, d* – при движении по прямоугольной траектории; *e, f* – при движении по траектории сложного треугольника; *g, h* – при движении по траектории сложной фигуры

Также во время данного эксперимента была зафиксирована интересная особенность в поведении робота: в процессе обводки заданной фигуры (рис. 11) робот в определенный момент был вынужден изменить свое положение для продолжения выполнения задачи. Это проявилось на другом графике (рис. 12), где видно отклонение траектории от основного контура фигуры. Несмотря на это, робот успешно вернулся в нужную точку и продолжил выполнение поставленной задачи, что свидетельствует о корректной работе системы управления и ее способности к адаптации в нестандартных ситуациях.

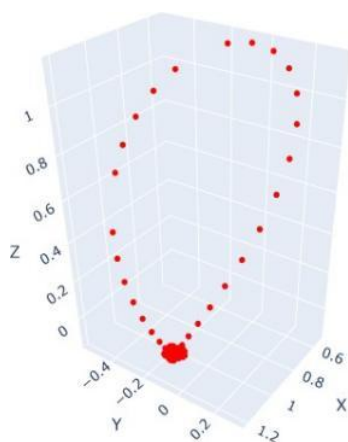


Рис. 11. Изменение положения конечного эффектора робота

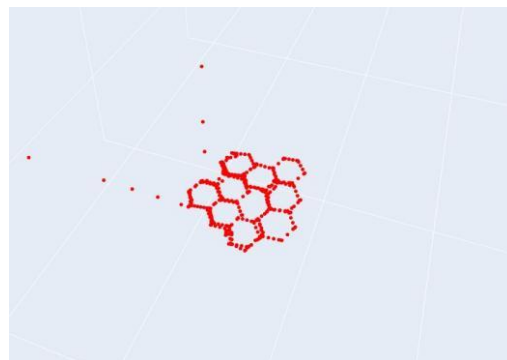


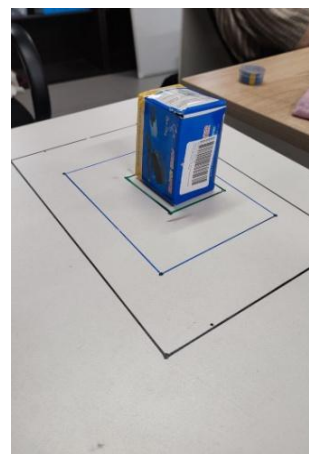
Рис. 12. Траектория конечного эффектора робота при движении по траектории сложной фигуры

### Сравнение эффективности управления манипулятором

В ходе работы были проведены эксперименты в симуляции, направленные на оценку требуемого времени при перемещении объекта прямоугольной формы в целевую область, размер которой последовательно уменьшался. Вначале задачи выполнялись человеком – оператор вручную перемещал объект (рис. 13, а) в три области разного размера (рис. 13, б), каждая из которых становилась все меньше. Было установлено, что по мере уменьшения области требовалась большая точность позиционирования, и время выполнения задачи увеличивалось.



а



б

Рис. 13. Постановка эксперимента с участием человека

Далее аналогичный эксперимент был проведен с использованием робота в симуляции под управлением разработанной VR-системы (рис. 14). Управление манипулятором осуществлялось посредством джойстика, причем предварительно был использован фиксированный коэффициент усиления, при котором движение

манипулятора строго соответствовало смещению джойстика. Такой метод оказался малоэффективным в узких целевых областях: высокая чувствительность затрудняла точное позиционирование, что приводило к значительному увеличению времени выполнения задачи и ошибкам размещения объекта.

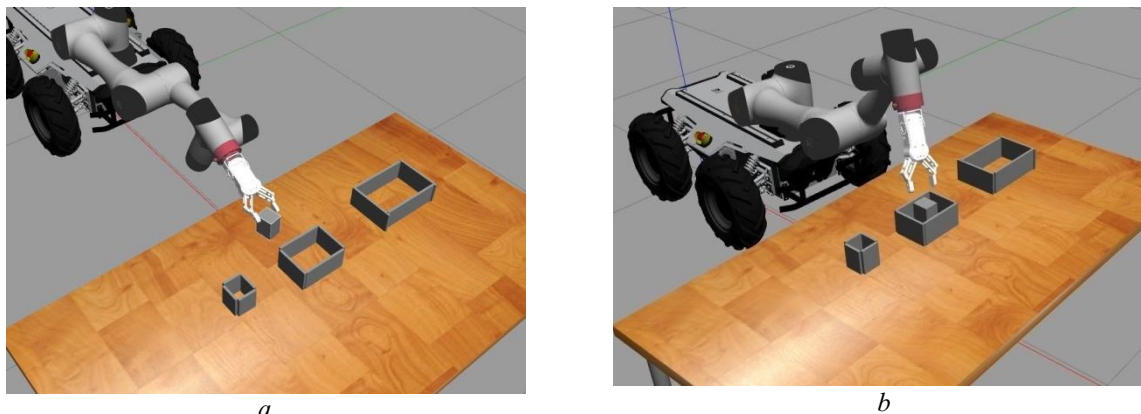


Рис. 14. Эксперимент в симуляции с управлением манипулятором робота:  
*a* – захват предмета роботом; *b* – перемещение предмета

Для повышения точности была реализована функция динамического изменения коэффициента усиления. Оператор мог уменьшать коэффициент при работе в узких зонах, что позволило аккуратно и точно управлять манипулятором, а при перемещении по свободному пространству – увеличивать коэффициент для ускорения работы. Повторный эксперимент с адаптивным коэффициентом показал сокращение времени выполнения задачи и увеличение точности позиционирования.

Результаты эксперимента показывают, что робот в симуляции выполнял задачу медленнее человека, особенно в узких зонах – разница достигала 5–7 раз. Это частично объясняется тем, что симуляция и VR-приложение запускались на одном ПК, что увеличивало вычислительные задержки. Кроме того, даже оператор без специальной подготовки показал высокую эффективность за счет интуитивного управления.

Внедрение адаптивного коэффициента усиления позволило заметно сократить время выполнения задачи по сравнению с фиксированным управлением и приблизить результаты робота к действиям человека. Это подтверждает перспективность адаптивных методов в задачах точного позиционирования.

В таблице приведены усредненные значения времени, которое требуется на выполнение задачи человеком вручную или с помощью робота. Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что удаленное управление роботом даже в такой простой задаче, как перемещение требует значительно большего времени, чем перемещение объекта человеком вручную, а также подтверждает, что применение адаптивных алгоритмов приближает эф-

фективность управления роботом к возможностям человека, особенно в сложных условиях.

Среднее время выполнения задачи (сек)  
 в разных зонах

| Условие          | Зона 1<br>(32х22см) | Зона 2<br>(14х19см) | Зона 3<br>(8х7 см) |
|------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Человек          | 3,35                | 3,74                | 4,93               |
| Робот (K=1)      | 15,8                | 24,6                | 34,2               |
| Робот (адапт. K) | 12,1                | 18,2                | 26,5               |

### Вывод

В результате работы была разработана и протестирована система удаленного управления робототехническим комплексом с применением VR-приложения и симуляционных средств. Реализованные решения обеспечили интуитивное взаимодействие оператора с манипулятором и мобильной платформой, а внедрение адаптивных методов управления повысило точность и эффективность выполнения задач.

В дальнейшем планируется развивать проект, уделяя особое внимание переходу к тестированию на реальном оборудовании, оптимизации обмена данными для сокращения задержек, расширению функциональности интерфейса и интеграции дополнительных видов обратной связи. Также проект будет совершенствоваться за счет устранения выявленных недостатков и регулярного обновления системы с учетом новых сценариев использования.

Таким образом, представленный подход оказывается перспективным инструментом для обучения операторов, тестирования новых алгоритмов и дальнейшей интеграции современных VR-технологий в робототехнику.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Abbas, J. R. What is Virtual Reality? A healthcare-focused systematic review of definitions / J. R. Abbas and others // Health Policy and Technology. – 2023. – Vol. 12, No. 2. – P. 100742. – DOI:10.1016/j.hlpt.2023.100742.
2. Hamad, A. How Virtual Reality Technology Has Changed Our Lives / A. Hamad, B. Jia // Frontiers in Virtual Reality. – 2022. – Vol. 3. – P. 856333. – DOI:10.3389/frvir.2022.856333.
3. Robotic Manipulator – an overview / S. J. Qin // ScienceDirectTopics, 2013. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/robotic-manipulator>.
4. Isermann, R. Basic Concepts of Manipulator Robot Control. / R. Isermann. – Berlin: Springer, 2005.
5. Sensorama, Morton Heilig's Early Virtual Reality Machine, 2024. – Режим доступа: <https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=2785>.
6. Smith, J. A Review of Early Virtual Reality Devices: The Case of Sensorama / J. Smith, A. Doe // PLOS One. – 2024. – Vol. 19, No. 6. – Режим доступа: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0305379>.
7. Development of Robotic Manipulators for Remote Control / L. Andersson // KTH Royal Institute of Technology, тех. отч., 2020. – Режим доступа: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1467108/FULLTEXT01.pdf>.
8. Lee, J. Robotic Manipulators in Modern Surgery: A Review / J. Lee, S. Kim // Journal of Robotic Surgery. – 2018. – Vol. 12. – Pp. 123-134. – Режим доступа: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6232426/>.
9. Damindarov, R. R. Design of Teleoperation System for Control over Industrial Manipulators with Upper-Limb Exoskeleton / R. R. Damindarov, I. Gaponov, A. V. Maloletov // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2024. – Vol. 20, No. 5. – Pp. 789-811.
10. Wang, H. Networked Control for Robotic Manipulators: Recent Advances and Challenges / H. Wang, X. Li // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2022. – Vol. 76. – P. 102352. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827122001524>.
11. Smith, J. Network Latency in Remote Robot Control: Challenges and Solutions / J. Smith, K. Lee // Future Internet. – 2024. – Vol. 16, No. 1. – P. 12-25. – DOI: 10.3390/fi16010012.
12. Latency Analysis in Teleoperated Robotic Systems / P. Andersen, M. Jensen // Technical University of Denmark, тех. отч., 2021. – Режим доступа: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/123456789/latency\\_report.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/123456789/latency_report.pdf).
13. Wang, H. Low-Latency Communication Technologies for Industrial Teleoperation / H. Wang, X. Li // KioskSoft Robotics Review. – 2023. – Vol. 11. – Pp. 55-63. – Режим доступа: <https://www.kiosksoft.com/roboticsreview/low-latency>.

УДК 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-52-56

*Д. А. Разумов, Е. С. Брискин*

**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОНТОНА-ЗАГЛУШКИ  
АВАРИЙНОЙ СКВАЖИНЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
С НАБЕГАЮЩИМ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ КАК ТВЕРДОГО ТЕЛА\***

**Волгоградский государственный технический университет**  
razumoff.dmitriy@yandex.ru, dtm@vstu.ru

Рассматривается задача определения усилий, действующих на твердое тело в водной среде со стороны потока жидкости. Решение поставленной задачи необходимо для изучения управляемого движения понтона-заглушки на устье аварийной скважины углеводородов. Разработана экспериментальная установка, позволяющая определить усилие, действующее на осесимметричное твердое тело, имитирующие заглушку в зависимости от его расположения относительно скважины. Установлена аналитическая зависимость величин усилия от расстояния между заглушкой и скважиной и ее угловым положением относительно оси скважины.

*Ключевые слова:* аварийная скважина углеводородов, глушение, заглушка, усилие, якорно-тросовые движители.

*D. A. Razumov, E. S. Briskin*

**ON THE FEATURES OF THE INTERACTION OF THE PONTOON PLUG  
OF THE EMERGENCY WELL OF THE ROBOTIC SYSTEM  
WITH THE INCIDENTAL FLOW OF LIQUID AS A SOLID BODY**

**Volgograd State Technical University**

The problem of determining the forces acting on a solid body in an aqueous medium from a liquid flow is considered. The solution to the problem is necessary for studying the controlled movement of a pontoon plug at the mouth of an emergency hydrocarbon well. An experimental device has been developed that makes it possible to determine the force acting on an axisymmetric rigid body depending on its location relative to the well. An analytical dependence of the force values on the distance between the plug and the well and its angular position relative to the axis of the well has been established.

*Keywords:* emergency well of hydrocarbons, jamming, plug, force, anchor-rope propellers.

© Разумов Д. А., Брискин Е. С., 2025.

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

### Введение

В настоящее время одна из характерных особенностей при добыче нефтепродуктов состоит в разработке подводных месторождений углеводородов. Одновременно возникает необходимость в разработке методов аварийного глушения скважин [1, 2]. Эта проблема решается различными способами [3–5], в частности, методом установки заглушки на ее устье с помощью якорно-тросовых движителей [6]. Якорно-тросовые движители рассматривались при изучении движения роботов-понтонных с небольшой положительной плавучестью при перемещении по дну водоема [7–10]. Однако для корректного расчета мест установки якорей и их количества, усилий, развиваемых приводами изменения длины тросов, изучения устойчивости движения перемещаемой заглушки необходимо установить зависимость усилия, действующего на заглушку со стороны струи углеводородов, как от взаимного расположения устья скважины и заглушки как твердого тела, так и от расхода извергаемых жидких углеводородов из аварийной скважины.

### Выбор расчетной схемы, постановка задачи

Рассматривается движение твердого тела в жидкости как материальной точки  $M$  массы  $m$ , подвешенной на тросе к неподвижной точке  $O$ . На материальную точку, помимо силы тяжести  $mg$ , действует достаточно интенсивный поток жидкости с силой  $F$ , источник которой точка  $A$

несоосно расположена по отношению к точке  $O$ . Учитывается, что вектор силы  $F$ , направлен вдоль  $AM$  (рис. 1).

Ставятся задачи определения зависимости усилий  $F$ , действующих на рассматриваемую точку от ее положения относительно источника потока жидкости точки  $A$  (величины несоосности  $c$ , глубины устья скважины  $h$ , длины троса  $l$ ) и массы  $m$  точки. Учитывать такое воздействие необходимо для построения системы автоматического управления движением заглушки в реальных условиях.

### Математическая модель

Составляются дифференциальные уравнения движения в естественной форме в проекциях на касательную  $\tau$  и нормальную  $n$  оси.

$$\begin{cases} ml\ddot{\alpha} = F \cos(\beta - \alpha) - mg \sin \alpha \\ ml\dot{\alpha}^2 = T - mg \cos \alpha + F \sin(\beta - \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

где  $T$  – усилие в тросе  $OM$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  – углы, характеризующие положение точки  $M$  относительно точки подвеса  $O$  и источника струи  $A$ .

Углы  $\alpha$  и  $\beta$  связаны соотношением:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h - l \cos \alpha}{c + l \sin \alpha}. \quad (2)$$

При малой величине несоосности  $c$  и угла отклонения  $\alpha$  с учетом линеаризации первое уравнение системы (1) преобразуется:

$$ml\ddot{\alpha} + (mg - \frac{hF}{h-l})\alpha = \frac{cF}{h-l}; \quad (3)$$

или

$$\ddot{\alpha} + k^2\alpha - p^2\alpha = qp^2; \quad (4)$$

$$\text{где } n = \frac{\mu}{2m}; k^2 = \frac{g}{l}; p^2 = \frac{hF}{(h-l)lm}; q = \frac{c}{h}.$$

Анализ уравнения (4) показывает, что в условиях малости углов  $\alpha$  оно может описывать два режима движения: гармонические колебания при  $k^2 > p^2$  и монотонное движение с возрастающей координатой  $\alpha$  при  $k^2 < p^2$ . Такое явление подобно явлению дивергенции [11].

Однако в случае колебаний его центр смещается на величину:

$$\alpha_* = \frac{qp^2}{k^2 - p^2}. \quad (5)$$

Откуда при экспериментально определенной величине  $\alpha_*$  можно получить величину для оценки силы  $F$ , действующей со стороны струи жидкости на материальную точку:

$$F = \frac{h-l}{h} \frac{\alpha_*}{q + \alpha_*} mg. \quad (6)$$

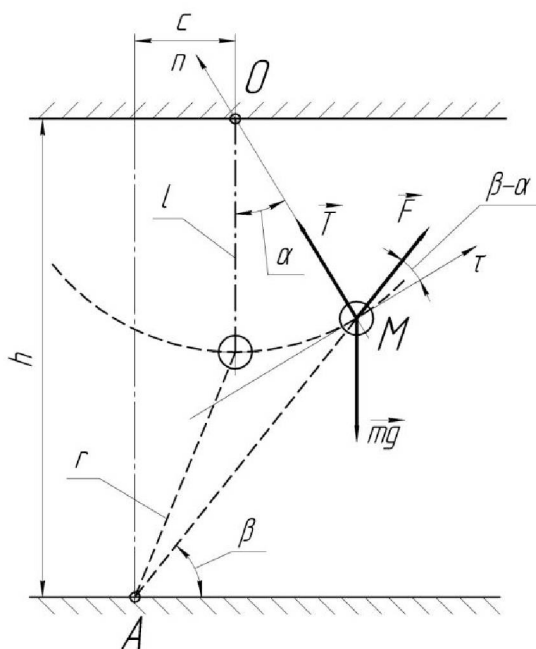


Рис. 1. Расчетная схема



С другой стороны, действие струи  $F$  оценивается и по изменению частоты колебаний. Действительно, из уравнения (4) следует, что частота наблюдаемых колебаний  $k_*$  определяется выражением:

$$k_* = \sqrt{k^2 - p^2}, \quad (7)$$

откуда для усилия  $F$  можно получить:

$$F = \frac{h-l}{h} ml \sqrt{\frac{g}{l} - k_*^2}. \quad (8)$$

Получившиеся выражения (6) и (8) позволяют определить разыскиваемые параметры  $P_0$  и  $\chi$  в предполагаемой зависимости усилия, действующего на твердое тело со стороны струи жидкости. [12]

$$F = \frac{P_0}{r^2} e^{-\chi c}. \quad (9)$$

Действительно, в отсутствии несоосности при  $c = 0$  из (8) следует:

$$P_0 = \frac{mlr^3}{h} \left[ \frac{g}{l} - k_*^2 \right]. \quad (10)$$

Тогда (6) для  $\chi$  имеет место формула:

$$\chi = -\frac{1}{c} \ln \frac{\alpha_*}{q + \alpha_*} \frac{r^3}{hP_0}. \quad (11)$$

Таким образом, при известных параметрах  $l, r, h, m, c$  формулы (10) и (11) позволяют в результате экспериментальных исследований определить  $P_0$  и  $\chi$ .

#### Описание лабораторной установки и методика экспериментальных исследований

Разработанная лабораторная установка (рис. 2) включает:

1. Емкость-водоем с плоскими боковыми поверхностями, заполненная водой;
2. Борт, состоящий из двух пластиковых панелей, скрепленных между собой болтовым соединением на стенке емкости. На борте наносится координатная сетка (с шагом 20 мм) для отслеживания движения маятника;
3. Маятник, состоящий из твердого тела цилиндрической формы, имеющий возможность скользить по боковой поверхности емкости, для обеспечения движения в вертикальной плоскости. Маятник крепится на оси к тонкому стержню  $AB$  длиной  $l$ , другой конец которого закреплен шарнирно в точке  $O$  на борту емкости с возможностью перемещаться по горизонтальной оси;
4. Шланг, из которого вертикально вверх извергается жидкость. Давление жидкости создается насосом;

#### 5. Опору для установки емкости-водоема.

Внутри емкости-водоема пропускается и крепится шланг, подключенный к насосу. Маятник крепится в точке  $O$  шарнирно, с возможностью перемещаться по горизонтали, а также изменять длину  $l$  стержня  $AB$ . Емкость заполняется водой, допускается перелив воды через емкость. Затем через шланг подается напор воды под давлением. Поток жидкости воздействует на маятник, тем самым заставляя его колебаться. Эксперимент с момента подачи давления записывается на видеокамеру с возможностью замедленной съемки. Уже на видеозаписи в замедленном режиме можно точно определить угол отклонения маятника  $\alpha$ , для этого в масштабе прочерчивается экспериментальная установка, наносится координатная сетка, после чего графическим методом определяются углы отклонения. Для определения положения маятника на него наносится метка-маркер, он находится в центре масс груза. Для проведения эксперимента требуется изменять варьируемые величины, в нашем случае это  $l$  – длина стержня  $AB$ , а также  $c$  – величина несоосности точки  $O$  относительно точки извержения жидкости.

На графике (рис. 3) представлена характерная зависимость изменения угла  $\alpha$  от времени  $t$  при длине троса маятника  $l = 0,235$  м, величине несоосности  $c = 0,016$  м, массе  $m = 0,061$  кг, глубины емкости  $h = 0,375$  м. Поддерживается постоянный расход истечения жидкости.

Точками отмечены экспериментально полученные значения  $\alpha_n$ , а сплошной линией – аппроксимированная кривая в соответствии с приближением одной гармонической ряда Фурье.

Обработка экспериментальных результатов показала, что среднеквадратичное относительное отклонение  $\sigma$  теоретических полученных значений угла  $\alpha(t)$  от экспериментально полученных данных  $\alpha_i$

$$\sigma = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_i} \left[ \frac{\alpha(t_i) - \alpha_i}{\alpha_i} \right]^2}, \quad (12)$$

составляет 11 %.

Тогда в результате серии экспериментов определяются в соответствии с (10) и (11)  $P_0$  и  $\chi$ , которые затем должны быть использованы при расчете усилия  $F$  (9), действующего на твердое тело при разработке робототехнической системы управления перемещением понтона-заглушки.



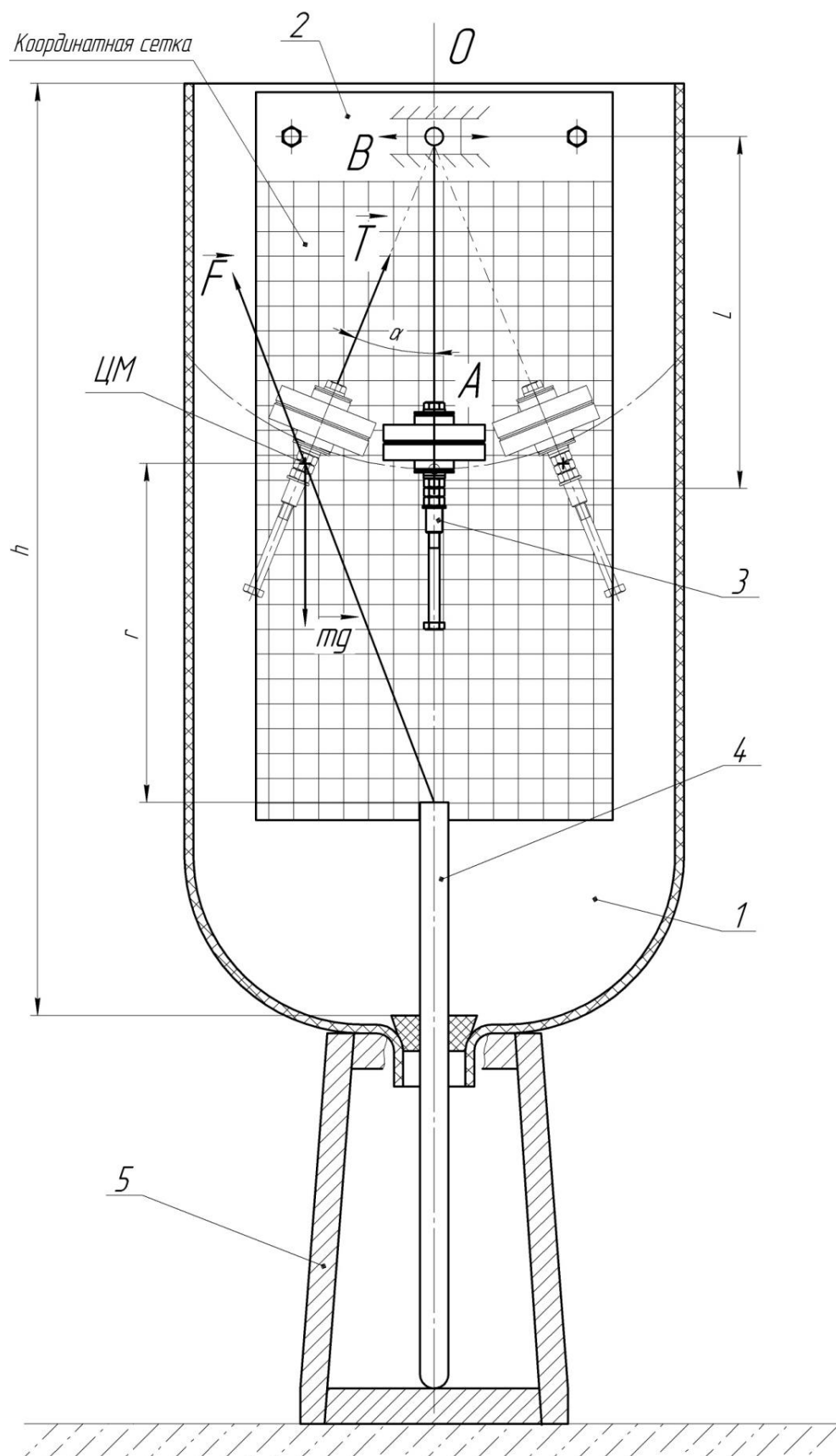


Рис. 2. Схема лабораторной установки:

1 – емкость-водоем; 2 – борт; 3 – маятник; 4 – шланг для подачи воды; 5 – опора

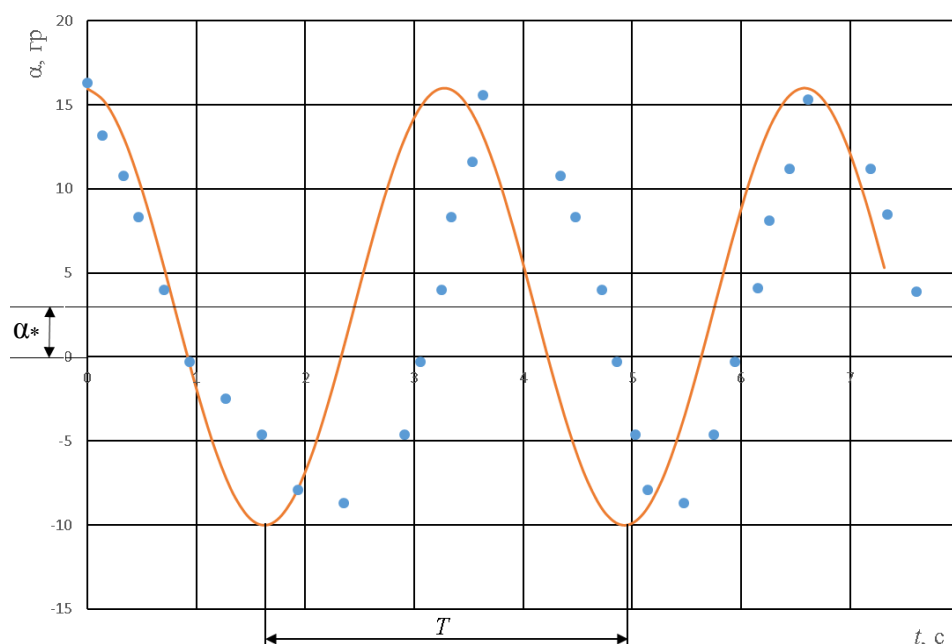


Рис. 3. График зависимости изменения угла от времени при  $c = 0,016$  м и  $l = 0,235$  м:

$\alpha_*$  — смещение центра колебаний;  $T = \frac{2\pi}{k_2}$  — период колебаний

### Выводы

1. Экспериментально подтверждена закономерность развиваемого усилия, действующего на твердое тело со стороны струи жидкости в зависимости от взаимного расположения источника струи и находящегося в жидкости твердого тела.

2. Установленная закономерность должна быть учтена при разработке системы управления движением твердого тела в жидкости для его точного позиционирования на дне водоема.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журавель, В. И. Аварийность на морских скважинах. Современное состояние количественной оценки рисков возможных выбросов / В. И. Журавель, И. В. Журавель // Oil and Gas Journal Russia. — 2013. — № 12.
2. Марков, О. В. Подводное противовыбросное оборудование и особенности управления скважиной на море: учеб. пособие / О. И. Марков, В. М. Подгорнов, В. И. Исаев. — М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2009. — 94 с.
3. Большой справочник инженера нефтегазодобычи. Бурение и закачивание скважин: пер. с англ. / под ред. У. Лайонза, Г. Плизга. — СПб.: Профессия, 2009. — 628 с.
4. Басаргин, Ю. М. Заканчивание скважин: учеб. пособие / Ю. М. Басаргин, А. И. Булатов, Ю. М. Проселков. — М.: Недра, 2000. — 670 с.
5. Калинин, А. Г. Бурение нефтяных и газовых скважин: учебник / А. Г. Калинин. — М.: ЦентрЛит Нефтегаз, 2008. — 848 с.
6. Артемьев, К. С. Об управлении движением понтона-заглушки подводной аварийной скважины / К. С. Ар-

темьев, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (256) / ВолгГТУ. — Волгоград, 2021. — С. 6–11.

7. Брискин, Е. С. Определение усилий в движителях якорно-тросового типа / Е. С. Брискин, И. С. Пеньшин, Л. Д. Смирная, Н. Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 14 (209) / ВолгГТУ. — Волгоград, 2017. — С. 87–90.

8. Пеньшин, И. С. Об управлении роботов-понтонных с якорно-тросовыми движителями / И. С. Пеньшин, Е. С. Брискин // XVI Всероссийская конференция по проблемам управления (МКПУ-2023): материалы конференции. В 4-х томах, Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. Том 1. — Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. — С. 201–203.

9. Гулевский, В. В. Управление ориентацией гусеничной цепи мобильных роботов с якорно-тросовыми гусеничными движителями / В. В. Гулевский, Е. С. Брискин // XVI Всероссийская конференция по проблемам управления (МКПУ-2023): Материалы конференции. В 4-х томах, Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. Том 1. — Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. — С. 145–148.

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

11. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. — Ленинград: Машиностроение, 1976. — 320 с.

12. Разумов, Д. А. О методике экспериментальных исследований особенностей взаимодействия понтона-заглушки с набегающим потоком жидкости / Д. А. Разумов // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2024. — № 9 (292). — С. 67–70.

УДК 531.36

DOI 10.35211/1990-5297-2025-9-304-57-61

*Л. Д. Смирная, И. П. Вершинина, Е. В. Дементьев***ОБ УПРАВЛЕНИИ ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯГОТЕНИЯ ЗА СЧЕТ НАЛОЖЕНИЯ СВЯЗЕЙ\*****Волгоградский государственный технический университет**

smirnaya@vstu.ru, ipvershinina@vstu.ru, evg7360@yandex.ru

Предложен метод изменения закона естественного движения твердого тела в поле силы тяготения за счет присоединения к нему дополнительных тел. Между исходным телом и дополнительно введенными устанавливаются связи. Эти связи рассматриваются как идеальные и могут быть как голономными, так и неголономными. Обсуждена практическая значимость предлагаемого метода.

*Ключевые слова:* поступательное движение, поле сил тяготения, управление движением, голономные и неголономные связи.

*L. D. Smirnaya, I. P. Vershinina, E. V. Dementiev***ON THE CONTROL OF THE TRANSLATIONAL MOTION  
OF A SOLID BODY IN THE GRAVITATIONAL FORCE FIELD DUE  
TO THE SUPERPOSITION OF CONSTRAINTS****Volgograd State Technical University**

A method is proposed for changing the law of natural motion of a solid body in the gravitational force field by attaching additional bodies to it. Constraints are established between the original body and the additional ones introduced. These constraints are considered as ideal and can be both holonomic and nonholonomic. The practical significance of the proposed method is discussed.

*Keywords:* translational motion, gravitational force field, motion control, holonomic and nonholonomic constraints.

**Введение**

Задача перемещения грузов в вертикальной плоскости является одной из актуальных задач во многих отраслях хозяйственной деятельности. Обычно она решается с помощью тех или иных грузоподъемных машин и механизмов: подъемные краны, лифты, манипуляторы и др. [1]. Причем они применяются как при подъеме грузов, так и при их опускании. В том и другом случаях расходуется энергия. При подъеме совершается полезная работа по подъему груза, а часть энергии затрачивается на необратимые потери, как правило тепловые. При опускании, при использовании нерекуперативного привода энергия затрачивается на необратимые потери, также, как правило, тепловые. Так, например, для двигателей постоянного тока развиваемый им момент обычно учитывается [2] линейной зависимостью от тока в электрической цепи, а тепловые потери пропорциональны его квадрату. Если учесть, что развиваемый момент пропорционален весу  $P$ , поднимаемого или опускаемого с постоянной скоростью груза, то

уровень тепловых потерь  $A$  определяется выражением:

$$A = \alpha \int_0^{\tau} P^2 dt, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от характеристик конкретного двигателя и привода подъема опускания,  $\tau$  – время работы.

Для снижения нагрузки  $P$  на двигатель применяется уравнивание. Однако это хотя и снижает уровень тепловых потерь, но полностью их не устраняет в силу необходимости подъема и опускания одним и тем же механизмом подъема и опускания тел различного веса. Поэтому востребованной становится задача перемещения грузов в поле сил тяжести, в частности их опускания в соответствии с заранее заданным законом без использования того или иного двигателя, а за счет накладываемых связей, как это имеет место во многих задачах робототехники [3–5].

© Смирная Л. Д., Вершинина И. П., Дементьев Е. В., 2025.

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

### Постановка задачи

Рассматривается механическая система с  $S$  степенями свободы. Накладываются как  $S-1$  голономных, так и неголономных стационарных связей. Кинетическая энергия  $T$  системы определяется выражением:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{y}^2 + \frac{1}{2} a_{ij} \dot{q}^i \dot{q}^j, \quad (i, j = 1 \dots S-1), \quad (2)$$

где  $a_{ij}$  – матрица инерционных коэффициентов, дополнительно присоединенной механической системы, элементы которой могут зависеть от всех обобщенных координат  $q_j$ ,  $y$ ;  $m$  – масса опускаемого груза; повторяющиеся индексы в (2), как это принято в тензорном анализе означают по ним суммирование.

Уравнения голономных связей задаются в форме:

$$f_k(q^1 \dots q^{n-1}, y) = 0, \quad (k = 1 \dots K), \quad (3)$$

а неголономных, линейных относительно скоростей, в виде:

$$A_{pi} \dot{q}^i + A_{py} \dot{y} = 0, \quad (p = 1, 2 \dots P), \quad (4)$$

где  $A_{pi}$ ,  $A_{py}$  – функции обобщенных координат.

Причем

$$P + K = S - 1. \quad (5)$$

Схематично рассматриваемая система представлена на рис. 1.

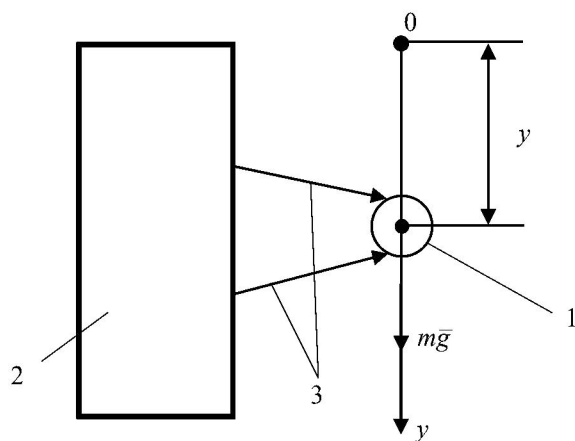


Рис. 1. Условная механическая система:  
1 – опускаемый груз; 2 – присоединенная механическая система;  
3 – накладываемые связи

Из активных сил, действующих на механическую систему, учитывается сила тяжести, приложенная к грузу  $m$ .

Дифференциальные уравнения движения рассматриваемой механической системы можно разделить на две группы. Первая группа состоит из одного уравнения, описывающего движение вдоль оси  $Oy$  груза массы  $m$ :

$$m\ddot{y} = mg + \sum_{k=1}^K \lambda^k \frac{\partial f_k}{\partial y} + \sum_{p=1}^P \lambda^p A_{py}. \quad (6)$$

Вторая группа состоит из  $S-1$  уравнений:

$$a_{ij} \ddot{q}^j + \left( \frac{\partial a_{ij}}{\partial q^k} - \frac{1}{2} \frac{\partial a_{kj}}{\partial q^i} \right) \dot{q}^j \dot{q}^k = \sum_{k=1}^K \lambda^k \frac{\partial f_k}{\partial q^i} + \sum_{p=1}^P \lambda^p A_{pi}, \quad (7)$$

где  $\lambda^k$ ,  $\lambda^p$  – неопределенные множители Лагранжа.

Ставится задача разработки кинематических схем присоединенных механических систем к перемещающемуся в поле тяготения твердого тела, обеспечивающих задаваемое программное движение рассматриваемого тела.

### Присоединенный механизм поступательного перемещения твердого тела

Рассматривается твердое тело массы  $m$ , перемещающееся вдоль вертикальной оси  $Oy$  под действием силы тяжести  $mg$ . Это тело связано шарнирно жестким невесомым стержнем длины  $l$  с телом массы  $M$ , перемещающимся по горизонтальной направляющей вдоль оси  $Ox$  (рис. 2). В начальный момент система находится в покое, а груз массы  $m$  в начале координат

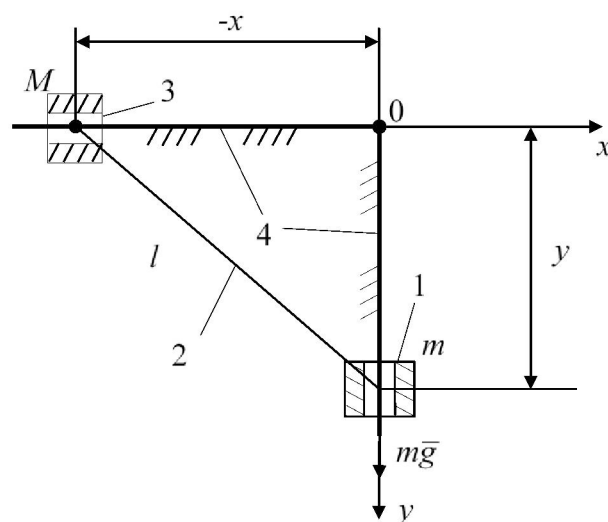


Рис. 2. Кинематическая схема механизма:  
1 – тело массы  $m$ ; 2 – невесомый стержень длины  $l$ ;  
3 – тело массы  $M$ ; 4 – направляющие

Рассматриваемая кинематическая схема соответствует введению одной голономной связи, накладываемой на механическую систему с двумя степенями свободы:

$$f(x, y) = y^2 + (-x)^2 - l^2 = 0. \quad (8)$$

Тогда, имея ввиду, что  $q_1 = x$ ,  $i = j = 1$ ,  $a_{ij} = M$ , уравнения (6), (7) приобретают форму:

$$\begin{cases} m\ddot{y} = mg + \lambda 2y, \\ M\ddot{x} = -2\lambda x. \end{cases} \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (8) и (9) позволяет получить зависимость  $y = y(t)$ . Позволяют они найти и зависимость  $V_y = V_y(y)$ . Так, если при  $t = 0$ ,  $y_0 = 0$ ,  $V_y = 0$ , то

$$V_y = \sqrt{\frac{2gy}{1 + \frac{\psi y}{\sqrt{l^2 - y^2}}}}, \quad (10)$$

где  $\psi = M/m$ .

На графиках (рис. 3) представлены зависимости при различных соотношениях масс  $\psi$ , скорости  $V_y$  от координаты  $y$  и  $l = 10$  м.

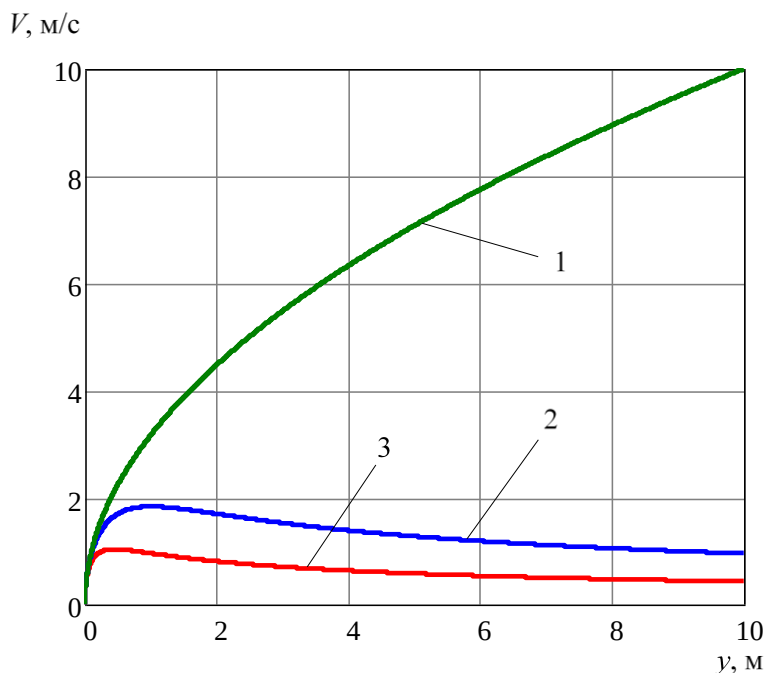


Рис. 3. Зависимость скорости опускания тела от его координаты:  
1 –  $\psi = 0$ ; 2 –  $\psi = 5$ ; 3 –  $\psi = 10$

Особенность движения тела состоит в том, что если  $\psi \neq 0$ , то независимо от массы  $M$  присоединенной системы при опускании с высоты  $l$  скорость тела в конечной точке равна нулю, а закон движения изменяется по сравнению со случаем свободного движения (рис. 3, (1)).

**Присоединение дополнительного механизма в виде маховика переменного радиуса, на винтовую поверхность которого навит трос с опускаемым грузом**

На рис. 4 представлена кинематическая схема рассматриваемого механизма, особенность работы которого состоит в том, что при опускании тела 1 вдоль вертикальной оси  $Oy$  маховик 3 совершает вращательное движение вокруг горизонтальной оси  $Ox$  и поступательное движение вдоль той же оси. Поступательное перемещение осуществляется за счет силы

давления троса на маховик в направлении по оси  $Ox$ .

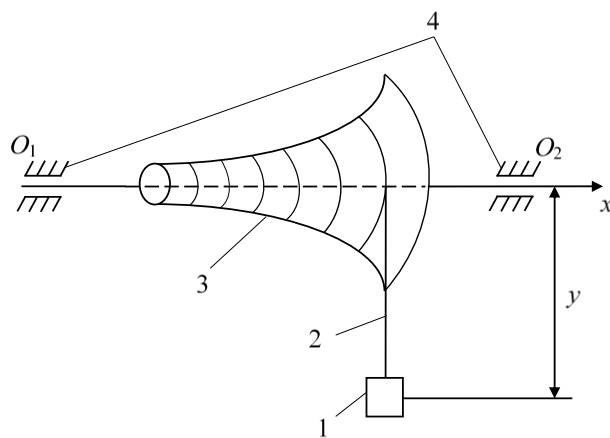


Рис. 4. Кинематическая схема механизма:  
1 – опускаемый груз; 2 – трос, навитый на маховик переменного радиуса  $R = R(x)$ ; 3 – маховик переменного радиуса; 4 – цилиндрические шарниры

В соответствии с (2) кинетическая энергия системы представляется в форме:

$$T = \frac{1}{2} J \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \dot{y}^2, \quad (11)$$

где  $M$ ,  $J$  – соответственно масса и момент инерции маховика относительно оси  $Ox$ .

На движение рассматриваемой механической системы накладывается связь:

$$\dot{y} - R(x)\dot{\varphi} = 0, \quad (12)$$

которая устанавливает зависимость скорости  $\dot{y}$  груза  $m$  от угловой скорости маховика и его смещения как твердого тела вдоль оси  $Ox$ .

Накладывается и голономная связь, устанавливающая связь между углом поворота маховика  $\varphi$  и его смещением вдоль оси  $Ox$ , что определяется уравнением винтовой линии на маховике, являющейся направляющей для троса:

$$\varphi - \Phi(x) = 0. \quad (13)$$

Тогда уравнения движения в случае идеальности связей имеют вид:

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} = -\lambda_1 R(x) + \lambda_2, \\ M\ddot{x} = -\lambda_2 \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \\ m\ddot{y} = mg + \lambda_1, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – неопределенные множители Лагранжа.

Однако анализ движения рассматриваемой механической системы удобно проводить на основе гипотезы об идеальности связей. В этом случае имеет место первый интеграл:

$$T + \Pi = \text{const}, \quad (15)$$

где  $\Pi$  – потенциальная энергия системы.

Тогда с учетом (11)–(13) при нулевых начальных условиях:  $\dot{y}_0 = 0$ ,  $\dot{\varphi}_0 = 0$ ,  $\dot{x}_0 = 0$  и, имея ввиду, что

$$\Pi = -mgy, \quad (16)$$

можно, как и для предыдущей механической системы (рис. 2), получить зависимость скоро-

сти  $\dot{y}$  груза массы  $m$  от его положения. Для этого, опираясь на (12) и (13), следует установить зависимости:

$$x = x(y), \quad \varphi = \varphi(y). \quad (17)$$

Действительно, если ввести функцию  $u = u(x)$ , удовлетворяющую дифференциальному уравнению:

$$\frac{du}{dx} = R(x) \frac{d\Phi}{dx}, \quad (18)$$

то из (12) с учетом (13) следует:

$$y = u(x). \quad (19)$$

Из (19) определяется первая из функций (17), которая в совокупности с (13) позволяет найти вторую функцию.

Тогда из (11) с учетом (16) и (17) следует:

$$\dot{y} = V_y = \sqrt{\frac{2gy}{\frac{J}{m} \left( \frac{d\varphi}{dy} \right)^2 + \psi \left( \frac{dx}{dy} \right)^2 + 1}}, \quad (20)$$

где  $\psi = M/m$ .

Так, если

$$\begin{cases} \varphi = ay + by^2, \\ x = \epsilon y + dy^2, \end{cases} \quad (21)$$

что обусловлено конструктивными параметрами маховика, то

$$V_y = \sqrt{\frac{2gy}{A + By + Cy^2}}, \quad (22)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , – параметры, зависящие от коэффициентов уравнений (21) и относительной массы  $\psi$  маховика. Так, если маховик имеет постоянный радиус  $R$ , а его масса распределена по ободу, то

$$A = \frac{M}{m} = \psi + 1. \quad (23)$$

На графиках (рис. 5) представлены зависимости  $V_y = V_y(y)$  при различных значениях  $B$  и  $C$  при  $\psi = 1$ .



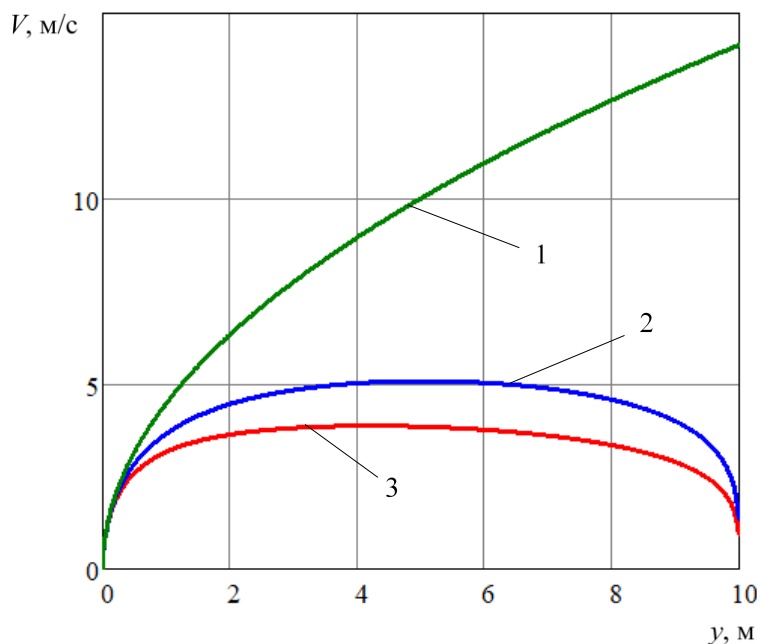


Рис. 5. Зависимость скорости опускаемого тела от его координат:  
1 –  $B=0$ ,  $C=0$ ; 2 –  $B=2$ ,  $C=2$ ; 3 –  $B=10$ ,  $C=10$

### Выводы

Полученные результаты подтверждают возможность управления движением механических систем за счет целенаправленного наложения связей. Этот способ, в отличие от управления движением тем или иным приводным двигателем, отличается большей энергоэффективностью, так как не требует дополнительного источника энергии.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крайнев, А. Ф. Словарь-справочник по механизмам / А. Ф. Крайнев // – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – 1987. – 560 с.
2. Брискин, Е. С. Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин,

А. В. Малолетов, В. В. Чернышев // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2014. – № 1. – С. 18–25.

3. Дементьев, Е. В. Конструктивная схема и принцип работы подводной роботизированной транспортной системы / Е. В. Дементьев, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (287) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – С. 55–59.

4. Брискин, Е. С. Энергетика и программное управление поступательным перемещением шагающего аппарата «циклон» / Е. С. Брискин, А. В. Леонард // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2016. – № 6. – С. 161–169.

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

Ответственный за выпуск  
Ирина Петровна **ВЕРШИНИНА**

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

Корректura **В. В. Свитачевой**  
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» (ВолгГТУ)

---

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.  
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)  
Телефон: гл. редактор – 8 (8442) 24-80-00  
**E-mail:** ianovakov@vstu.ru

---

Темплан 2025 г. Поз. № 8ж. Дата выхода в свет 16.09.2025 г. Формат 60 x 84 1/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 4,02  
. Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 337.

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

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

---

В научном журнале «Известия ВолгГТУ», серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы», публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований в области механики и управления движением робототехнических систем и их мехатронных узлов.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word 2003-2007 и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм). УДК статьи обязательно.

Для ускорения подготовки издания необходимо отправлять файлы статей на электронный адрес [rm@vstu.ru](mailto:rm@vstu.ru) в полном соответствии с распечатанным оригиналом.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см; нижнее – 3,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал 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 Math Type. Формулы в тексте должны быть напечатаны без дополнительных интервалов между строками текста. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Нумерация формул по всей статье должна быть сквозной. Таблицы должны содержать заголовки. В компьютерном варианте иллюстрации следует готовить в векторных форматах. В растровых форматах допускаются только фотографии.

В тексте, формулах и на рисунках латинские буквы следует набирать *курсивом*. Русские и греческие буквы, цифры, стандартные функции (sin, cos, sign, max, const, log, det, exp и т. п.) должны иметь прямое начертание. В основе матриц лежат круглые скобки, в основе определителей – прямые линии.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, на котором работает автор статьи. Если коллектив авторов включает сотрудников различных учреждений, необходимо указать место работы каждого автора. Далее – электронный адрес (-а) авторов, аннотация к статье и ключевые слова (на русском и английском языках). В конце статьи ставится подпись автора (на бумажном варианте).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Рекомендованный объем статьи – **8–9 страниц** бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список.

Рекомендуется включать в журнал статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номера служебного и домашнего телефонов, E-mail); документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.