

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-523

doi: 10.30987/2658-6436-2023-2-58-68

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОЛЁСНОГО ПРИВОДА ПОДЛЁДНОГО РОБОТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Сергей Федорович Яцун¹, Андрей Васильевич Мальчиков^{2✉}, Борис Владимирович
Лушников³, Евгений Николаевич Политов⁴

^{1, 2, 3, 4} Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

¹teormeh@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

²zveroknnp@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>

³bvl_61@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2288-2991>

⁴politovyevgeny@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

Аннотация. Цель исследования состоит в разработке конструкции и исследовании системы управления колёсного подводного робота с регулируемой плавучестью для подлёдного мониторинга подводных объектов. В рамках исследования ставится задача разработки математической модели и её компьютерной реализации для управляемого движения колёсного робота по внутренней поверхности льда, а также постановка вычислительных экспериментов, демонстрирующих работоспособность предлагаемой системы автоматического управления антипробуксовочного устройства. В работе используются как классические методы построения и исследования математических моделей и систем управления мобильных роботов, так и оригинальные методики численного интегрирования систем нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих эффекты проскальзывания колёс робота относительно опорной поверхности льда. Новизна работы заключается в использовании оригинального способа перемещения колёсного робота на границе сред с регулированием нормальной реакции за счёт управления объёмом колёсных воздушных баллонов и контролем проскальзывания с помощью системы автоматического управления, обеспечивающей повышение энергоэффективности работы приводов в процессе разгона. В ходе исследования были разработаны: оригинальная конструкция и способ перемещения робота для мониторинга подводных объектов, расчётная схема устройства и структурная схема системы управления приводной системы робота. Создана математическая модель, описывающая управляемое движение объекта и выполнен комплекс вычислительных экспериментов, доказывающих применимость предлагаемых методов реализации движения без пробуксовки ведущих колёс мобильного робота. Предлагаемый в работе способ перемещения имеет ряд ключевых преимуществ при осуществлении мониторинга подводных объектов, однако реализация преимуществ на практике сопряжена с необходимостью использования системы контроля проскальзывания колёс робота с опорной поверхностью. В работе предложена структура и алгоритмы системы управления, позволяющие обеспечить движение с минимальным проскальзыванием, а вычислительные эксперименты на математической модели устройства доказывают её применимость и эффективность.

Ключевые слова: колёсный подводный робот, подводный мониторинг, контроль проскальзывания, система управления, математическое моделирование

Финансирование: работа выполнена при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональных возможностей человека».

Для цитирования: Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Лушников Б.В., Политов Е.Н. Система управления колёсного привода подлёдного робота для мониторинга подводных объектов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №2 (20). С. 58-68. doi: 10.30987/2658-6436-2023-2-58-68.

Original article

Open Access Article

WHEEL DRIVE CONTROL SYSTEM OF AN UNDER-ICE ROBOT FOR MONITORING UNDERWATER OBJECTS

Sergei F. Yatsun¹, Andrey V. Malchikov^{2✉}, Boris V. Lushnikov³, Evgeny N. Politov⁴

^{1,2,3,4} Southwest State University, Kursk, Russia

¹teormeh@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

²zveroknnp@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>

³bvl_61@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2288-2991>

⁴politovyevgeny@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

Abstract. *The aim of the study is to develop a design and to study the control system of a wheeled underwater robot with adjustable buoyancy for under-ice monitoring of underwater objects. As part of the study, the task is to generate a mathematical model and its computer implementation for the controlled movement of a wheeled robot on the inner surface of ice, as well as to set up computational experiments demonstrating the operability of the proposed automatic control system for an anti-slip device. The work uses both classical methods for constructing and studying mathematical models and control systems for mobile robots, as well as original methods for numerically integrating systems of nonlinear differential equations that describe the effects of slipping the robot wheels relative to the supporting ice surface. The novelty of the work lies in using an original way of moving a wheeled robot at the interface of media with regulating the normal reaction by controlling the volume of wheeled air cylinders and controlling slippage using an automatic control system that improves the drive energy efficiency while accelerating. In the course of the study, the authors developed: an original design and a method of moving a robot for monitoring underwater objects, a design diagram of the device and a schematic design of the robot drive control system. A mathematical model is created that describes the object controlled motion and a set of computational experiments is performed to prove the applicability of the proposed methods for implementing movement without slipping the driving wheels of a mobile robot. The method of moving proposed in the paper has a number of key advantages in monitoring underwater objects; however, implementing the advantages in practice is associated with the necessity to use a system for controlling slippage of the robot wheels with a supporting surface. The paper proposes the structure and algorithms of the control system to ensure movement with minimal slippage, and computational experiments on the mathematical model of the device prove its applicability and effectiveness.*

Keywords: wheeled underwater robot, underwater monitoring, slippage controlling, control system, mathematical modelling

Funding: The work was supported by the Strategic Project «Priority-2030. Creation of robotic means to expand a person's functional capabilities».

For citation: Yatsun S.F., Malchikov A.V., Lushnikov B.V., Politov E.N. Wheel drive control system of an under-ice robot for monitoring underwater objects. Automation and modeling in design and management, 2023, no. 2 (20). pp. 58-68. doi: 10.30987/2658-6436-2023-2-58-68.

Введение

Известно, что немалая часть объектов хозяйственной инфраструктуры сегодня находится под водой. Это кабели связи и интернета, трубопроводы, опоры мостов и причалов, подводные части гидросооружений, таких как причалы, плотины, дамбы и т.д. [1 – 2] Поддержание эксплуатационных свойств таких объектов, предотвращение возможных аварий требует выполнения регулярных осмотровых работ и мониторинга за их состоянием [3 – 4]. Однако в Арктической зоне, а также в зимние месяцы многие водоёмы покрыты льдом, что делает невозможным выполнение данных работ без погружения под воду, а привлечение водолазов сопряжено с повышенными рисками для их жизни и дополнительными расходами [5]. Для обеспечения мониторинга подводных объектов весьма рациональным является использование мобильных роботов, оснащенных необходимым оборудованием и способных выполнять требуемые операции [6 – 12]. Наличие льда на поверхности водоёма, открывает возможности использование границы раздела сред для скоростного и энергоэффективного перемещения за счёт гусеничных или колесных движителей [13 – 15]. Перемещение робота по внутренней поверхности льда имеет преимущество при выполнении видеосъёмки или других типов диагностики за счёт надежного позиционирования в неподвижном состоянии без потребления дополнительной энергии на компенсацию внешних воздействий – течений, волнения и т.д. Кроме того, подводный робот, способный эффективно перемещаться по внутренней поверхности льда, может найти применение для поисковых задач и задач сопровождения, например, ледоколов при прохождении участков с возможной подлёдной опасностью [14].

Предлагаемое в работе роботизированное устройство способно изменять собственную плавучесть для обеспечения управления нормальными реакциями в точках контакта колёс с поверхностью льда. Это открывает дополнительные возможности по преодолению препятствий – трещин, выступов, полыньи и т.д. Вместе с тем перемещение по поверхности льда требует контроля процесса взаимодействия колёс со льдом, предотвращения проскальзывания для обеспечения энергоэффективного перемещения.

В работе ставится задача создания математической модели и системы управления мобильного подлёдного колёсного робота, позволяющих установить закономерности влияния различных параметров устройства на кинематические и динамические характеристики движения подо льдом, определить их рациональные значения и настройки системы управления колесным приводом.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Рассмотрим более подробно конструкцию и принцип управляемого движения подводного робота для подлёдного перемещения. На рис. 1 показаны следующие основные конструктивные элементы: 1 – корпус робота; 2 – колесный диск с грунтозацепами; 3 – заднее ведомое колесо; 4 – резервуар со сжатым воздухом; 5 – модули электроники; 6 – аккумуляторные батареи; 7 – управляемый пневматический распределитель; 8 – колёсные приводы постоянного тока; 9 – навесное диагностическое оборудование; 10 – колёсные баллоны с изменяемым объемом для управления нормальной реакцией в точках касания колёс с опорной поверхностью льда.

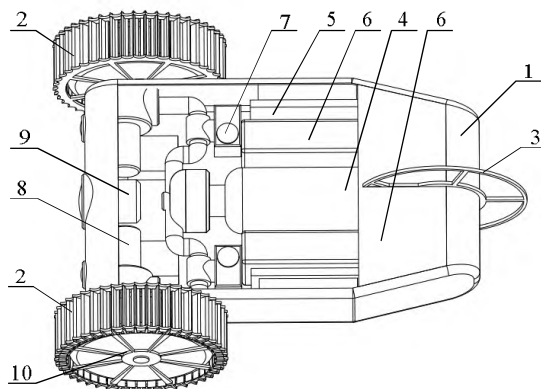


Рис. 1. Трехмерная модель прототипа подлёдного робота
Fig. 1. Three-dimensional model of the under-ice robot prototype

В начальный момент времени баллоны внутри колёс спущены, робот при этом имеет слабо положительную плавучесть, что позволяет оператору без труда запустить его под лёд через прорубь. Оказавшись под водой, робот задействует распределители, закачивая в колесные баллоны воздух из резервуара высокого давления. Баллоны под действием давления воздуха расширяются, увеличивая свой объём и заполняя собой внутреннюю полость колёсного диска, тем самым увеличивая плавучесть. После обеспечения требуемых нормальных реакций и соответствующих им сил сцепления ведущих колёс робота с внутренней поверхностью льда, задействуется приводная система колёс. Создаваемые крутящие моменты через силы трения сцепления обеспечивают движение робота, что фиксируется набором датчиков, в том числе датчиком угла поворота ведущих колёс и ведомого заднего колеса. Задание параметров движения может осуществляться как заранее оператором, так и осуществляться в режиме реального времени по проводному интерфейсу робота.

В отличие от управляемого движения колёсного робота по поверхности на суше, при движении в вязкой водной среде, где поджатие к поверхности льда обусловлено только силой Архимеда, возникающей за счет увеличения объема колесных баллонов, обеспечение минимизации проскальзывания является сложной задачей, требующей как развитой системы грунтозацепов и протектора, реализующих хорошее сцепление колёс со льдом, так и специального алгоритма системы управления, учитывающего особенности динамики процесса.

Будем рассматривать задачу управления как обеспечение требуемых скоростных параметров движения: $Q = (V^*, \Omega^*)$, где V^* – требуемая линейная скорость движения робота; Ω^* – скорость поворота робота относительно неподвижной системы координат.

Обобщенная структурная схема системы управления робота и его расчетная схема представлены на рис. 2.

На данной схеме приняты следующие обозначения: $R_V, R_\Omega, R_{\omega L}, R_{\omega R}$ – регуляторы, соответственно линейной скорости, скорости разворота корпуса, частоты вращения левого и правого колёс; $EncL, EncR, EncC$ – инкрементальные энкодеры, определяющие фактическую частоту вращения колес. На схеме также показаны основные силы, действующие на робота: F_{AC}, mg – приведенные силы Архимеда и силы тяжести корпуса робота с колёсами со спущенными колёсными баллонами; N_{1L}, N_{1R}, N_2 – нормальные реакции в точках контакта, соответственно левого, правого и ведомого колёс; F_{f1L}, F_{f1R} – силы трения сцепления колес; F_{AWL} и F_{AWR} – силы Архимеда, обусловленные объёмом левого и правого колёсных баллонов;

F_{μ} – сила вязкого сопротивления движению, зависящая от площади лобового сечения и обтекаемости робота; M_{d1L} , M_{d1R} и M_{r1L} , M_{r1R} – соответственно моменты электроприводов левого и правого колёс и моменты сил трения качения левого и правого ведущих колёс; M_{r2} – момент трения качения ведомого колеса (далее будем считать этот момент пренебрежимо малым и не будем его учитывать при моделировании и составлении уравнений).

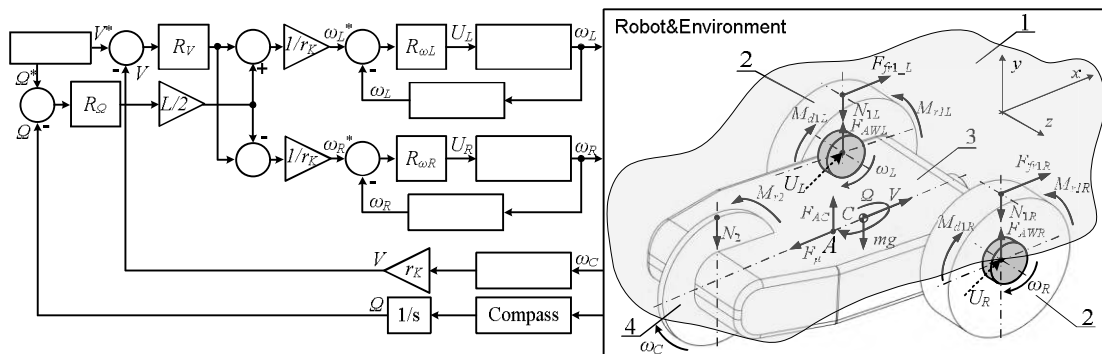


Рис. 2. Схема системы управления и расчетная динамическая схема подлёдного робота:
 1 – лёд; 2 – ведущие колёса; 3 – корпус робота; 4 – ведомое измерительное колесо

Fig. 2. Scheme of the control system and design of the under-ice robot:
 1 – ice; 2 – driving wheels; 3 – robot body; 4 – passive measuring wheel

Согласно принятой расчетной схеме, центр масс устройства располагается в точке C и смещен относительно центра (т. A) объёма конструкции. За счет этого и обеспечивается наклонное (колесами вниз) нейтральное положение под водой. Однако после накачки колесных баллонов и создания дополнительных сил Архимеда, робот стремится развернуться, принимая горизонтальное положение и обеспечивая требуемую силу поджатия к поверхности льда, необходимую для возможности движения.

Как видно из схемы системы управления, движение вдоль желаемой траектории может быть осуществлено заданием желаемых законов изменения скорости поступательного движения и поворота корпуса робота. При этом фактическая линейная скорость робота определяется пересчетом угловой скорости ведомого заднего колеса, а угловая скорость разворота может быть получена дифференцированием сигнала с магнитометра, расположенного на корпусе робота.

После расчета требуемых угловых скоростей вращения колес ω_L^* , ω_R^* , контуры системы управления приводов рассчитывают напряжения питания для двигателей с учётом показаний датчиков-энкодеров, расположенных непосредственно на ведущих колесах.

Предварительные результаты численного моделирования показали, что в случае превышения предельной силы сцепления между колесом и поверхностью льда происходит проскальзывание, что вызывает нарушение работы системы управления. Очевидно, что для достижения наиболее эффективного энергопотребления и точности движения по траектории необходимо недопущение проскальзывания колёс робота относительно поверхности льда. Ситуация затрудняется тем, что под водой определение фактической линейной скорости робота затруднено. Здесь возможно использование глобальной навигационной спутниковой системы для определения положения устройства и слежения за скоростью, но такая система имеет низкую точность, кроме того, сигнал от спутников может не проходить через толстый слой непрозрачного льда. Использование различных оптических систем слежения за перемещением также может быть затруднено из-за отражающих свойств льда. Наиболее простым и точным способом измерения фактической скорости является оценка угла поворота ведомого колеса, расположенного в задней части робота (см. рис. 2). Использование бесконтактного инкрементального энкодера позволяет обеспечить минимальный момент сопротивления вращению оси колеса.

Далее рассмотрим более подробно эффект проскальзывания ведущих колёс и его влияние на динамику робота. Так как система управления левого и правого колёс идентичны, далее будем рассматривать плоскую задачу, расчетная схема которой с соответствующей структурной схемой системы управления представлена на рис. 3.

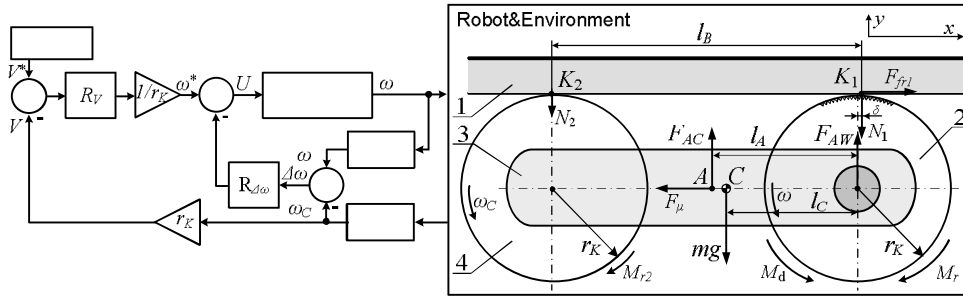


Рис. 3. Схема одноканальной системы управления и плоская расчётная схема подлёдного робота:
 1 – лёд; 2 – ведущее колесо; 3 – корпус робота; 4 – пассивное колесо

Fig. 3. Planar scheme of the control system and the under-ice robot:
 1 – ice; 2 – drive wheel; 3 – robot body; 4 – passive wheel

Обозначения, принятые для данной схемы, соответствуют приведенным ранее (для сил и моментов, действующих на ведущее колесо, индекс не указан). Дополнительно обозначены: $\Delta\omega = (\omega - \omega_c)$ – величина проскальзывания колес относительно опорной поверхности, оцениваемая как разность вращений ведущих и ведомого колес; $R_{\Delta\omega}$ – регулятор проскальзывания; l_B – расстояние между точками контакта колёс робота с поверхностью льда K_1 и K_2 ; l_C – расстояние от оси вращения ведущих колес до центра масс C ; l_A – расстояние от оси вращения ведущих колёс до центра (т. A) приложения силы Архимеда; r_K – радиус ведущих колёс робота.

В общем случае в качестве регуляторов $R_V, R_{\Omega}, R_{\omega L}, R_{\omega R}, R_{\Delta\omega}$ – могут быть использованы как классические ПИД-регуляторы, так и более сложные, а параметры могут быть получены, например, методом численного зондирования параметрического пространства в ходе математического моделирования [16, 17]. В рамках настоящей работы для регулятора величины проскальзывания ($R_{\Delta\omega}$) предлагается использовать П-регулятор, а в качестве регулятора линейной скорости (R_V) – инкрементный цифровой ПД-регулятор [18, 19]. При записи выражения для напряжения примем следующие обозначения $e_i = (V_i^* - V_i)$ – ошибка линейной скорости, на i -том такте работы регулятора. В данном выражении V_i^* – заданная оператором линейная скорость движения робота; V_i – текущее значение линейной скорости (на i -том такте работы регулятора), определяемое по скорости вращения ведомого колеса: $V_i = \omega_{ci} r_K$ (ω_{ci} – скорость вращения ведомого колеса); $\Delta e_i = (V_i^* - V_i) - (V_{i-1}^* - V_{i-1})$ – изменение ошибки линейной скорости на текущем i -том и предыдущем такте работы регулятора.

Тогда, согласно предлагаемой стратегии управления, напряжение питания двигателя можно представить в виде:

$$U_i = \frac{k_p e_i + k_d \frac{\Delta e_i}{\Delta t}}{r_K} - k_{p\omega} (\omega_i - \omega_{ci}), \quad (1)$$

где k_p, k_d – пропорциональный и дифференциальный коэффициенты регулятора линейной скорости; $k_{p\omega}$ – коэффициент П-регулятора проскальзывания.

Для получения рациональных параметров регулятора, а также анализа влияния параметров системы на динамику движения, в частности на энергоэффективность движения, в работе выполнено математическое моделирование динамики движения рассматриваемого робота с учётом возможного проскальзывания ведущих колёс.

Согласно схеме, показанной на рис. 3, можем записать выражения для нормальных реакций, возникающих в точках контакта колёс с внутренней поверхностью льда, следующим образом:

$$N_1 = F_{AC} \left(1 - \frac{l_A}{l_B}\right) + F_{AW} - mg \left(1 - \frac{l_C}{l_B}\right); \quad (2)$$

$$N_2 = F_{AC} \frac{l_A}{l_B} - mg \frac{l_C}{l_B}. \quad (3)$$

Анализ данных формул позволяет понять, что изменение объема баллонов в колёсах приводит к увеличению дополнительной архимедовой силы F_{AW} и реакции N_1 ведущих колес, что необходимо для создания сил сцепления и движения объекта по поверхности льда.

Для состояния покоя и движения без проскальзывания, т.е. когда выполняется условие $F_{fr1} < f_1 N_1$, динамика робота определяется системой:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{fr1} - F_{\mu} \\ \dot{\phi} = \dot{x}/r_K \end{cases} \quad (4)$$

Для движения с проскальзыванием, когда силы сцепления достигают своих предельных значений ($F_{fr1} = f_1 N_1$), динамика определяется системой:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{fr1} - F_{\mu} \\ J_k \ddot{\phi} = M_d - M_r - f_1 N_1 r_K \end{cases} \quad (5)$$

В данных уравнениях: $F_{\mu} = \mu \dot{x}$ – сила вязкого сопротивления среды; M_d – крутящий момент, развиваемый приводной системой робота; $M_r = \delta N_1$ – момент трения качения (δ – коэффициент трения качения колеса); f_1 – коэффициент сцепления ведущего колеса; J_k – приведенный момент инерции колеса.

Выражение для силы сцепления представим в виде:

$$F_{fr1} = \begin{cases} \left(\frac{M_d - M_r - J_k \ddot{\phi}}{r_K} - m\ddot{x} \right), \text{ если } \left(\frac{M_d - M_r - J_k \ddot{\phi}}{r_K} - m\ddot{x} \right) < f_1 N_1 \\ f_1 N_1, \text{ если } \left(\frac{M_d - M_r - J_k \ddot{\phi}}{r_K} - m\ddot{x} \right) \geq f_1 N_1 \end{cases} \quad (6)$$

При моделировании динамики электропривода воспользуемся уравнением для крутящего момента в следующей форме:

$$M_d = k_m \left(\frac{U - k_e \dot{\phi} i_G}{R} \right) i_G \eta, \quad (7)$$

где k_m – моментный коэффициент двигателя привода колеса; k_e – коэффициент противо-ЭДС, ω – частота вращения колеса; R – сопротивление якорной обмотки двигателя; i_G , η – передаточное число и коэффициент полезного действия редуктора; U – напряжение питания двигателя, формируемое системой управления в соответствии с выбранной стратегией.

Численные значения основных параметров математической модели робота представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры модели колёсного подлёдного робота

Table 1

Main parameters of the wheeled under-ice robot model

Параметр	Значение
Масса корпуса робота m , кг	7,7
Масса колеса робота m_k , кг	0,15
Водоизмещение корпуса робота, л	8
Водоизмещение колесных баллонов, л	0...1,5
База опорных элементов по длине корпуса l_B , м	0,5
Радиус ведущих колес r_K , м	0,2
Расстояние от оси ведущих колёс до центра объема корпуса l_A , м	0,25
Расстояние от оси ведущих колёс до центра масс l_C , м	0,2
Коэффициент сцепления ведущих колёс f_1	0,75
Коэффициент трения качения ведущих колёс δ , м	0,005
Коэффициент вязкого сопротивления среды μ , Нс/м	1,2
Моментный коэффициент k_m , Нм/А	0,0141
Коэффициент противо-ЭДС k_e , В/с/рад	0,0139
Сопротивление обмотки двигателя R , Ом	0,196
Передаточное число редуктора i_G	4
КПД механической передачи η	0,85

Одним из способов обеспечения отсутствия проскальзывания ведущих колёс при разгоне является плавное нарастание требуемой скорости на ведущих колёсах, которое может быть реализовано гладким законом изменения напряжения для приводов. При этом максимальное значение напряжения, а также время разгона, не допускающего проскальзывания, будет определяться предельной силой сцепления, которая, в свою очередь, зависит от физи-

ческих свойств контактирующих элементов и величины поджатия колёс робота к поверхности льда.

Результаты

Покажем примеры работы системы без контроля проскальзывания с гладким законом изменения заданной линейной скорости V^* (рис. 4). Для удобства анализа результатов моделирования, величину проскальзывания представим в виде разности линейной скорости точки на ободе и скорости корпуса робота. При формировании закона изменения задающей скорости используем кусочно-полиномиальную функцию [20].

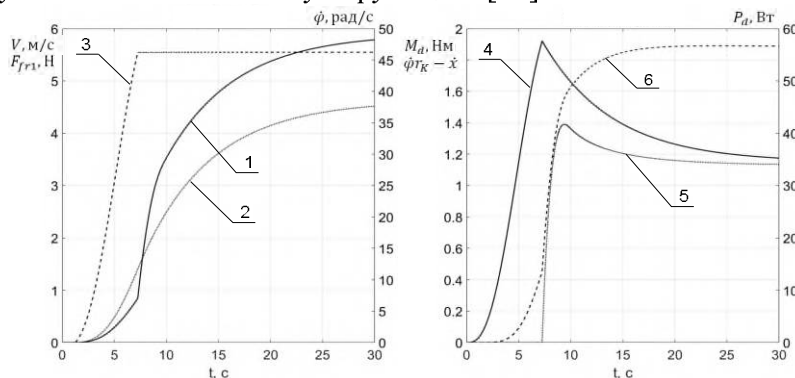


Рис. 4. Результаты моделирования динамики колесного робота с программно-заданным законом изменения линейной скорости V^* :

1 – угловая скорость вращения ведущего колеса (рад/с); 2 – линейная скорость корпуса робота (м/с); 3 – сила сцепления ведущих колес (Н); 4 – крутящий момент на ведущих колесах (Нм); 5 – величина проскальзывания (м/с); 6 – механическая мощность привода робота

Fig. 4. Results of modeling the dynamics of a wheeled robot with a software-specified law of change in the linear velocity V^* :

1 – velocity of the drive wheel (rad/s); 2 – linear speed of the robot body (m/s); 3 – friction force (N); 4 – actuator torque (Nm); 5 – slippage value (m/s); 6 – actuator mechanical power

Как следует из анализа результатов моделирования, при заданной максимальной желаемой скорости движения (5 м/с) и указанных параметров привода, даже плавный разгон вызывает появление проскальзывания на 7 секунде. Далее робот продолжает разгон, но уже с пробуксовывающими колёсами. При этом максимальный крутящий момент достигает значения 1,9 Нм, а максимальное проскальзывание составляет 1,4 м/с. Так как рост частоты вращения двигателя не ограничен системой управления, то через 45 с приводы выходят на установившуюся частоту вращения около 55 рад/с, что соответствует механической мощности 57 Вт.

Для наглядной демонстрации эффективности работы антипробуксовочной системы, покажем результаты моделирования при неоптимальном коэффициенте регулятора проскальзывания $k_{p\omega} = 2$ (рис. 5).

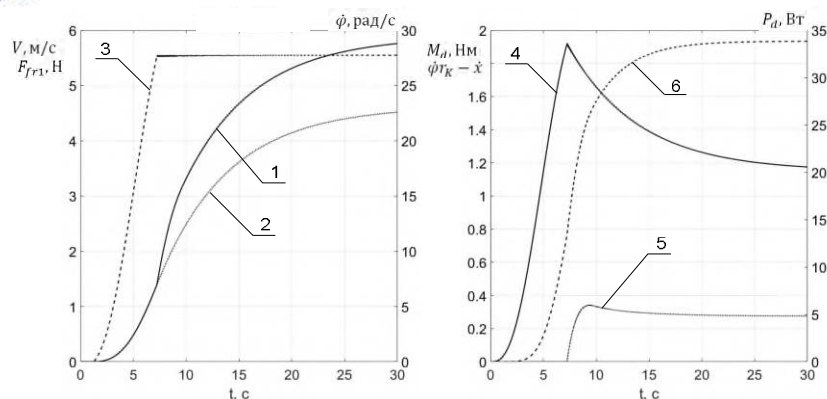


Рис. 5. Результаты моделирования динамики колесного робота с П-регулятором проскальзывания ($k_{p\omega} = 2$) (обозначения кривых те же, что и на рис. 4)

Fig. 5. Results of simulating the dynamics of a wheeled robot with a slip-controller ($k_{p\omega} = 2$) (the designations of the curves are the same as in Fig. 4)

Как очевидно из результатов моделирования, введение ограничения подводимой мощности в соответствии с формулой (1), приводит к значительному снижению угловой скорости колеса, хотя и не устраняет проскальзывание полностью. Однако использование даже неоптимального параметра регулятора, позволило сократить максимальное значение проскальзывания до 0,35 м/с, а требуемую мощность до 34 Вт. При этом темп нарастания скорости корпуса практически не изменился, так как динамика разгона определяется исключительно свойствами среды и сцеплением робота с поверхностью при обеспечении достаточно-го крутящего момента со стороны приводной системы.

На рис. 6. показаны результаты численного моделирования системы с оптимизированным значением коэффициента пропорциональности в контуре регулирования проскальзывания. Дальнейшее увеличение коэффициента приводит к появлению колебательности и потере устойчивости системы.

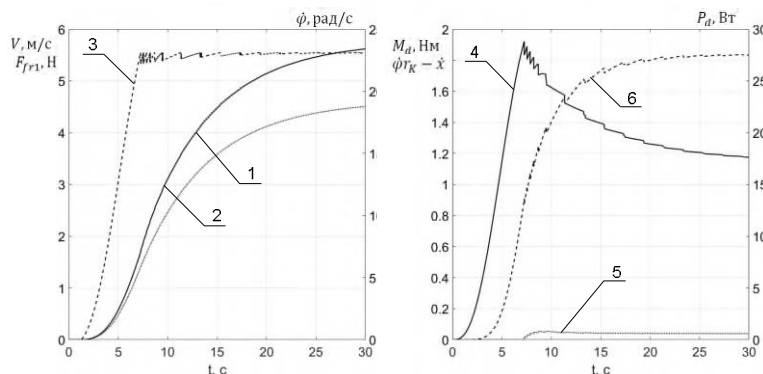


Рис. 6. Результаты моделирования динамики колесного робота с оптимизированным П-регулятором проскальзывания ($k_{p\omega} = 18,2$) (обозначения кривых те же, что и на рис. 4)

Fig. 6. Simulation results of the dynamics of a wheeled robot with an optimized slip-controller ($k_{p\omega} = 18,2$) (the designations of the curves are the same as in Fig. 4)

Результаты данного эксперимента показали возможность практически полного исключения проскальзывания (максимальное значение 0,08 м/с) с сохранением динамики разгона робота. Максимальная потребляемая мощность при этом не превышает 27 Вт, что практически в 2 раза ниже, чем в первом эксперименте, где система контроля проскальзывания не была задействована.

Для оценки энергоэффективности предложенной антипробуксовочной системы управления приводами ведущих колёс мобильного робота на рис. 7 приведены временные диаграммы: $\eta_M(t) = \frac{F_{fr} r_1 V}{M_d \dot{\phi}}$ – к.п.д. процесса преобразования вращательного движения колес в поступательное движение корпуса (рис. 7, а); и $\eta_E(t) = \frac{F_{fr} r_1 V}{UI}$ – к.п.д. преобразования затрачиваемой электрической энергии приводной системы в механическую энергию движения робота (рис. 7, б).

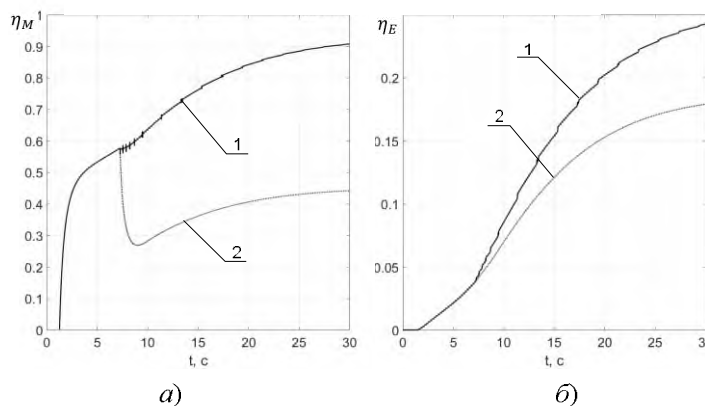


Рис. 7. Эффективность преобразования энергий при работе с регулятором (1) и без регулятора проскальзывания (2)

Fig. 7. Energy conversion efficiency with regulator (1) and without slip-regulator (2)

Согласно результатам моделирования, использование системы контроля проскальзывания в 2 раза увеличивает к.п.д механического преобразования движителя, значение которого достигает уровня около 94 %. Общая энергоэффективность, выражаемая отношением механической энергии движения к затрачиваемой электрической, при использовании регулятора повышается с 19 % до 26 %.

Заключение

Роботизированный мониторинг объектов подводной инфраструктуры водоёмов, покрытых льдом, может быть осуществлён посредством колёсного робота, перемещающегося по внутренней поверхности льда. Перемещение на границе раздела сред даёт ряд преимуществ, среди которых высокое быстродействие и эффективность, точность перемещений, возможность сохранять своё положение под действием внешних сил, не используя приводную систему.

Однако указанные преимущества требуют контроля проскальзывания ведущих колёс относительно поверхности льда. Предложенная в работе структура системы управления, позволяющая ограничивать подводимую мощность в соответствии с величиной проскальзывания, позволяет минимизировать энергопотери за счёт пробуксовки. В работе предложена математическая модель, представленная системой нелинейных дифференциальных уравнений, позволяющих моделировать процесс управляемого движения как в режиме движения без проскальзывания, так и с его учётом. Результаты численных экспериментов на математической модели устройства доказали эффективность предлагаемой методики. Для используемых в модели параметров с помощью контроля проскальзывания удалось сократить энергопотребление в 2 раза с сохранением динамики разгона робота.

Список источников:

1. Харин И.О., Князев Н.П., Скуднев Д.М. Межконтинентальные сети коммуникации // Информационные технологии в процессе подготовки современного специалиста. – 2017. – С. 113-118.
2. Бабкин Ю.А., Федоров А.В. Автоматизация процессов измерений и контроля линейного тракта подводных волоконно-оптических линий связи для Арктической зоны Российской Федерации // Арктика: история и современность. – 2017. – С. 200-209.
3. Юха С. Арктические подводные коммуникационные кабели и региональное развитие северных территорий // Арктика и Север. – 2018. – №. 32. – С. 63-81.
4. Миддлтон А. Сила коммуникационного взаимодействия в Арктике: участие граждан в арктических институтах // Арктика и Север. – 2021. – №. 42. – С. 170-185.
5. Piazza P., Cummings V. J., Lohrer D. M. et al. Divers-operated underwater photogrammetry: Applications in the study of Antarctic benthos // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2018. – Т. 42. – С. 885-892.
6. Матвиенко Ю.В., Ремезков А.В. Концепция создания роботизированного комплекса обследования и мониторинга технического состояния объектов подводной добычи // Газовая промышленность. – 2020. – №. S2. – С. 172-179.
7. Шматов А.А., Шматов А.Г., Сергейчиков О.А. Современное состояние производства и перспективы развития серийных российских телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов // Газовая промышленность. – 2020. – №. S2. – С. 156-160.

References:

1. Kharin I.O., Knyazev N.P., Skudnev D.M. Intercontinental Communication Networks. In: Interuniversity Proceedings: Information Technologies in the Process of Training a Modern Specialist: 2017. p. 113-118.
2. Babkin Yu.A., Fedorov A.V. Automation of the Measurement and Control of the Linear Path of Underwater Fibre-Optic Communication Lines for the Arctic Zone of the Russian Federation. In: Proceedings of the International Scientific Conference: The Arctic: History and Modernity: 2017. p. 200-209.
3. Juha S. Arctic Subsea Communication Cables and the Regional Development of Northern Peripherals. Arctic and North. 2018;32:63-81. doi: 10.17238/issn2221-2698.2018.32.63
4. Middleton A. The Power of Connectivity in the Arctic: Citizen Participation in Arctic Institutions. Arctic and North. 2021;42:170-185. doi: 10.37482/issn2221-2698.2021.42.170
5. Piazza P., Cummings V.J., Lohrer D.M., et al. Divers-Operated Underwater Photogrammetry: Applications in the Study of Antarctic Benthos. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018;42:885-892. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-885-2018
6. Matvienko Yu.V., Remezko A.V. The Concept of Creating a Robotic Complex for Surveying and Monitoring the Technical Condition of Underwater Production Facilities. Gas Industry. 2020;S2:172-179.
7. Shmatkov A.A., Shmatkov A.G., Sergeychikov O.A. The Current State of Production and Prospects for the Development of Serial Russian Remote-Controlled Uninhabited Underwater Vehicles. Gas Industry. 2020;S2:156-160.

8. Яцун С.Ф., Лущников Б.В., Казарян К.Г. Конструктивные особенности бионического робота-рыбы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 94-102.
9. Jatsun S., Lushnikov B., Politov E. et al. Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modelling and full-scale tests of the prototype // MATEC Web of Conferences – 2017. С. 02014.
10. Wu Y., Ta X., Xiao R. et al. Survey of underwater robot positioning navigation // Applied Ocean Research. – 2019. – Т. 90. – С. 101845.2
11. Cui R., Chen L., Yang C. et al. Extended state observer-based integral sliding mode control for an underwater robot with unknown disturbances and uncertain nonlinearities // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – Т. 64. – № 8. – С. 6785-6795.
12. Petillot Y.R., Antonelli G., Casalino G. et al. Underwater robots: From remotely operated vehicles to intervention-autonomous underwater vehicles // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2019. – Т. 26. – № 2. – С. 94-101.
13. Цыфанский С.Л. Новый способ движения на границе природных сред подледный транспортный аппарат // Наука, техника и образование. – 2015. – №4 (10). – С. 43-49.
14. Jakuba M.V., German C.R., Bowen A.D. et al. Teleoperation and robotics under ice: Implications for planetary exploration // 2018 IEEE Aerospace Conference. – IEEE, 2018. – С. 1-14.
15. Berisford D.F., Leichty J.M., Klesh A.T. et al. Remote under-ice roving in Alaska with the buoyant rover for under-ice exploration // AGUF All Meeting Abstracts. – 2013. – Т. 2013. – С. C13C-0684.
16. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Adaptive Control System for DC Electric Drive under Uncertainty // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2020. – С. 1-5.
17. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Comparative analysis of the industrial exoskeleton control systems // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" ER (ZR). – Springer Singapore, 2020. – С. 63-74.
18. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66-74; 2007. – № 1. – С. 78-88.
19. Borase R.P., Maghade D.K., Sondkar S.Y. et al. A review of PID control, tuning methods and applications // International Journal of Dynamics and Control. – 2021. – Т. 9. – С. 818-827.
20. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. et al. Simulation of a walking robot-exoskeleton movement on a movable base // Journal of Artificial Intelligence and Technology. – 2021. – Т. 1. – № 4. – С. 207-213.
8. Yatsun S.F., Lushnikov B.V., Kazaryan K.G., et al. Design Features of the Bionic Robot Fish. Proceedings of the South-West State University. Series: Engineering and Technologies. 2017;7(2):94-102.
9. Jatsun S., Lushnikov B., Politov E. et al. Underwater Floating Robot-Fish: a Comparative Analysis of the Results of Mathematical Modelling and Full-Scale Tests of the Prototype. MATEC Web of Conferences. 2017:02014. doi: 10.1051/matecconf/201711302014
10. Wu Y., Ta X., Xiao R., et al. Survey of Underwater Robot Positioning Navigation. Applied Ocean Research. 2019;90:101845.2.
11. Cui R., Chen L., Yang C., et al. Extended State Observer-Based Integral Sliding Mode Control for an Underwater Robot with Unknown Disturbances and Uncertain Nonlinearities. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017;64(8):6785-6795. doi: 10.1109/TIE.2017.2694410
12. Petillot Y.R., Antonelli G., Casalino G., et al. Underwater Robots: From Remotely Operated Vehicles to Intervention-Autonomous Underwater Vehicles. IEEE Robotics & Automation Magazine. 2019;26(2): 94-101. doi: 10.1109/MRA.2019.2908063
13. Tsyfansky S.L. A New Way of Movement on the Border of Natural Environments – Under-Ice Transport Vehicle. Science, Technology and Education. 2015;4(10):43-49.
14. Jakuba M.V., German C.R., Bowen A.D., et al. Teleoperation and Robotics Under Ice: Implications for Planetary Exploration. In: Proceedings of 2018 IEEE Aerospace Conference; IEEE: 2018. p. 1-14. doi:10.3390/rs12162588
15. Berisford D.F., Leichty J.M., Klesh A.T., et al. Remote Under-Ice Roving in Alaska With the Buoyant Rover for Under-Ice Exploration. AGUF All Meeting Abstracts. 2013;2013:C13C-0684. doi: 10.1016/j.fmre.2021.03.002
16. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Adaptive Control System for DC Electric Drive Under Uncertainty. In: Proceedings of 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM); IEEE: 2020. p. 1-5. doi:10.1109/ICIEAM48468.2020.9111876
17. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Comparative Analysis of the Industrial Exoskeleton Control Systems. In: Proceedings of the 14th International Conference on Electromechanics and Robotics: Zavalishin's Readings; ER (ZR): Springer Singapore: 2020. p. 63-74. doi: 10.1007/978-981-13-9267-2_6
18. Denisenko V.V. PID Controllers: Principles of Construction and Modification. Modern Automation Technologies. 2006;4:66-74; 2007;1:78-88.
19. Borase R.P., Maghade D.K., Sondkar S.Y., et al. A Review of PID Control, Tuning Methods and Applications. International Journal of Dynamics and Control. 2021;9:818-827. doi: 10.1007/s40435-020-00665-4
20. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A., et al. Simulation of a Walking Robot-Exoskeleton Movement on a Movable Base. Journal of Artificial Intelligence and Technology. 2021;1(4):207-213. doi: 10.37965/jait.2021.0009

Информация об авторах:

Яцун Сергей Федорович – доктор технических наук, профессор, зав. каф., проф. ММИР ЮЗГУ, Scopus-Author ID: 55884423000, Research- ID-Web of Science: G-3891-2017, Author-ID-РИНЦ: 109404, ORCID:0000-0002-7420-0772

Мальчиков Андрей Васильевич – кандидат технических наук, доцент каф. ММИР ЮЗГУ, Scopus-Author ID: 56073335100, Research- ID-Web of Science: N-8856-2016, Author-ID-РИНЦ: 579832, ORCID: 0000-0003-2902-1721

Лушников Борис Владимирович – кандидат технических наук, доцент каф. ММИР ЮЗГУ, Scopus-Author ID 36675155400, Research- ID-Web of Science G-8554-2013, Author-ID-РИНЦ 161968, ORCID: 0000-0003-2288-2991

Политов Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент каф. ММИР ЮЗГУ, Scopus-Author ID 57194635674, Author-ID-РИНЦ 176177, ORCID: 0000-0002-0597-8505

Information about authors:

Yatsun Sergey Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Mechanics, Mechatronics and Robotics», Professor of Southwest State University, Scopus-Author ID: 55884423000, Research-ID-Web of Science: G-3891-2017, Author-ID-RSCI: 109404, ORCID: 0000-0002-7420-0772

Malchikov Andrey Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Mechanics, Mechatronics and Robotics» of Southwest State University, Scopus-Author ID: 56073335100, Research-ID-Web of Science: N-8856-2016, Author-ID-RSCI: 579832, ORCID: 0000-0003-2902-1721

Lushnikov Vladimir Borisovich – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Mechanics, Mechatronics and Robotics» of Southwest State University, Scopus-Author ID: 36675155400, Research-ID-Web of Science: G-8554-2013, Author-ID-RSCI: 161968, ORCID:0000-0003-2288-2991

Politov Evgeny Nikolaevich – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Mechanics, Mechatronics and Robotics» of Southwest State University, Scopus-Author ID: 57194635674, Author-ID-RSCI: 176177, ORCID: 0000-0002-0597-8505

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.04.2023; одобрена после рецензирования 26.04.2023; принята к публикации 03.05.2023.

The article was submitted 05.04.2023; approved after reviewing 26.04.2023; accepted for publication 03.05.2023.

Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.