



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Мешковский Евгений Олегович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СОГЛАСОВАННОГО
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПРОМЫШЛЕННОГО
ЧЕТЫРЁХКОЛЁСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Фролов Владимир Яковлевич

Научный консультант:

кандидат технических наук, доцент

Курмашев Арон Даутханович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент,

директор учебно-научного центра

информационных технологий обучения

ФГАОУ ВО «Севастопольский

государственный университет»,

г. Севастополь

Семькина Ирина Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,

директор научно-производственного центра

«Прецизионная электромеханика», профессор

факультета систем управления и

робототехники ФГАОУ ВО «Национальный

исследовательский университет ИТМО»,

г. Санкт-Петербург

Томасов Валентин Сергеевич

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 21 октября 2021 г. в 14–00 часов на заседании диссертационного совета У.05.09.03 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главный учебный корпус, ауд. 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года

Учёный секретарь

диссертационного совета У.05.09.03

кандидат технических наук, доцент



Иванов Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия во многих отраслях человеческой деятельности увеличивается процент внедрения автоматически управляемых колёсных роботов. При управлении колёсными роботами возникает большое количество задач, среди которых управление системой электроприводов, позволяющее поддерживать скорость робота при движении вдоль траектории с минимальными отклонениями.

С увеличением числа приводных колёс робот становится многосвязным объектом управления, что является следствием наличия множества внутренних связей физической природы между отдельными приводами. Данный факт приводит к необходимости проектирования особых систем управления электроприводами колёс – систем согласованного управления. Также в процессе перемещения могут возникать неблагоприятные ситуации, которые могут увеличивать своё влияние на контурное движение. Многие из них уже решены в работах российских (О.Г. Андриановой, С.Ф. Бурдакова, А.В. Влаховой, Р.Ф. Гилимянова, А.И. Дивеева, К.С. Ефремова, А.А. Колесникова, В.И. Матюхина, И.В. Мирошника, В.В. Павловского, В.Е. Павловского, О.А. Перегудовой, А.В. Пестерева и другие) и зарубежных (К. Alipour, С. Caceres, G. Campion, М.Н. Falsafi, М. Hashimoto, М. Kurokawa, М.В. Menhaj, J.M. Rosario, L. Schulze, К. Takahashi, В. Tarvirdizadeh и другие) исследователей.

Зачастую при внедрении колёсных роботов в технологический процесс промышленных предприятий, разработчик систем управления ограничен в выборе оборудования аппаратной части и, как следствие, в вычислительных ресурсах, что не позволяет применить многие разработанные решения. По этой причине необходимы разработки, способные поддерживать необходимые показатели качества работы колёсного робота при ограниченных ресурсах аппаратной части промышленной системы управления.

Таким образом, диссертационная работа посвящена решению актуальной проблемы разработки и исследования системы согласованного управления электроприводами промышленного четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками с целью достижения максимальной эффективности при движении вдоль заданной программной траектории.

Объект исследования в данной работе – промышленный четырёхколёсный мобильный робот с двумя дифференциальными приводными блоками. **Предметом исследования** является применение согласованного управления электроприводами колёсных роботов с дифференциальными приводными блоками с целью увеличения добротности воспроизведения траектории.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности управления системой электроприводов рассматриваемого объекта на основе построения системы согласованного управления. В качестве критерия оценки

эффективности будет использоваться максимум добротности воспроизведения траектории. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

1. построить математическую модель сложной многосвязной динамической системы четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками;

2. синтезировать систему согласованного управления электроприводами объекта исследования;

3. реализовать синтезированную систему согласованного управления на аппаратной базе исследуемого объекта;

4. определить критерий и метод параметрической оптимизации системного регулятора;

5. провести численные и натурные эксперименты с оценкой качества регулирования по критерию максимума добротности воспроизведения траектории;

6. проанализировать вычислительные ресурсы, необходимые для работы спроектированной системы согласованного управления.

Методы исследования. В работе применяются методы теории управления линейных, нелинейных и дискретных систем, теории электроприводов, теории нечётких множеств, теории искусственных нейронных сетей, линейной алгебры, теоретической механики, теории и практики построения информационно-измерительных и управляющих систем. Достоверность результатов обеспечивалась аналитическими, вычислительными и экспериментальными методами верификации предлагаемых решений.

Научная новизна. Диссертационное исследование содержит:

1. математическую и программную модель четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками, которая учитывает кинематику робота, динамику силомоментных процессов, несимметричность элементов конструкции, и обладает возможностью масштабирования;

2. систему согласованного управления электроприводами колёсного робота, структура которой позволяет производить замену системного регулятора;

3. систему расчёта траекторной ошибки для отдельных точек колёсного робота, учитывающую особенности их расположения;

4. системный регулятор в трёх различных формах (нелинейный, нечёткий и нейросетевой) для роботов с дифференциальными приводными блоками, учитывающий асимметрию конструкции и способный к расширению;

5. методику расчёта коэффициентов локальных регуляторов скорости подсистемы электроприводов, учитывающую особенность аппаратной части системы управления;

6. критерий оптимальности для проведения параметрической оптимизации системного регулятора.

Научная ценность состоит в возможности использования полученных теоретических результатов (математическая модель объекта, система

согласованного управления со всеми разработанными элементами, критерий оптимальности параметрической оптимизации) не только для электротехнических комплексов на базе электродвигателей, но и для систем с двигателями других типов (гидравлические, пневматические).

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в демонстрации относительно законченной структуры системы согласованного управления электроприводами колёс промышленных роботов с дифференциальными приводными блоками. В работе описаны физические процессы, протекающие в колёсных роботах такого типа, раскрыты основные элементы, входящие в состав разработанной системы управления, а также показаны результаты натурных экспериментов, подтверждающие возможность применения представленных решений.

Практическая ценность. Результаты диссертационной работы могут использоваться:

1. для ускорения разработки, реализации и настройки системы управления электроприводами исследуемого мобильного робота;
2. для подбора компонентов аппаратной части системы управления;
3. для выбора структуры системы согласованного управления;
4. для определения конфигурации аппаратной части системы управления.

Научные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся:

1. математическая модель четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками;
2. система согласованного управления электроприводами объекта исследования совместно с системой расчёта траекторной ошибки, способом настройки локальных регуляторов скорости электроприводов, системными регуляторами трёх типов (нелинейный, нечёткий и нейросетевой);
3. критерий оптимальности параметрической оптимизации системного регулятора.

Степень достоверности результатов. Степень достоверности результатов обусловлена корректным применением современных методов численного моделирования, экспериментальной апробацией разработанных систем управления, печатными публикациями.

Апробация результатов. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: VII Международная конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020», г. Санкт-Петербург, 2020; XXIX Международная научно-практическая конференция «Российская наука в современном мире», г. Москва, 2020; IV Международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности», г. Казань, 2020; XI Международная научно-практическая конференция «Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации», г. Пенза, 2020; V Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в современном мире», г. Москва, 2020; Международная научная конференция «Высокие технологии и

инновации в науке», г. Санкт-Петербург, 2020; V Международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности», г. Казань, 2020; XXVIII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире», г. Санкт-Петербург, 2020; II международная научно-практическая конференция «Инновационная траектория развития современной науки: становление, развитие, прогнозы», г. Петрозаводск, 2020.

Реализация результатов работы. Результаты исследования приняты к внедрению в ООО «ФАМ», г. Санкт-Петербург. Предлагаемые в работе результаты реализованы на аппаратной базе разрабатываемых устройств.

Публикации по работе. По материалам диссертационных исследований опубликовано 19 работ, из них 5 статей в научно-рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 1 статья в научном журнале, индексируемом в системе цитирования SCOPUS, и 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (182 наименования) и приложений. Общий объём диссертации составляет 178 страниц основного текста, 48 рисунков, 10 таблиц, четыре приложения на 16 листах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показаны актуальность работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Описана цель и поставлены задачи диссертационного исследования.

В первой главе проведены анализ проблемы, обзор существующих решений и расширена постановка задачи. Анализ проблемы и краткий обзор оборудования аппаратной части системы управления (СУ), применяемого в промышленных колёсных роботах, позволили расширить обоснование актуальности темы исследования. Так как систему управления исследуемого колёсного робота можно отнести к классу контурных, для оценки качества регулирования было предложено применить добротность воспроизведения траектории:

$$D_{v,\varepsilon} = \frac{v_c}{\varepsilon_c}, \quad (1)$$

где v_c – контурная скорость, ε_c – контурная ошибка, вычисляемая как среднеквадратичное отклонение (с.к.о.) от траектории.

На основе характеристики (1) был указан критерий эффективности – максимум добротности воспроизведения траектории, достигаемый 1) увеличением v_c при фиксированной ε_c , 2) уменьшением ε_c при фиксированной v_c , или 3) увеличением v_c с уменьшением ε_c . Расчёты, основанные на особенностях организации работы колёсного робота в технологическом процессе, показали, что увеличение $D_{v,\varepsilon}$ благоприятно

сказывается на работе предприятий за счёт уменьшения времени перемещения робота.

Анализ существующих решений показал отсутствие разработок, применимых для исследуемого объекта управления. Многие из них направлены на решение задачи для мобильных роботов других конструкций. Предлагаемые решения в обобщённой форме являются слишком громоздкими для реализации в промышленных логических контроллерах (ПЛК). Применение метода разделения и вынесение сложных вычислений на другой аппаратный элемент с использование беспроводной передачи данных невозможно использовать из-за требований к безопасности промышленных СУ. Данные факты подтвердили необходимость поиска решения задачи.

Дополнительно был произведён анализ литературы с целью поиска математической модели объекта исследования. По результатам сделан вывод о необходимости её построения.

В конце главы поставлены цели и задачи исследования.

Во второй главе демонстрируется построение математической модели исследуемого колёсного робота (упрощённая кинематическая схема приведена на рис. 1). При выполнении данной задачи использовалась комбинация кинематических уравнений центров масс колёс и корпуса

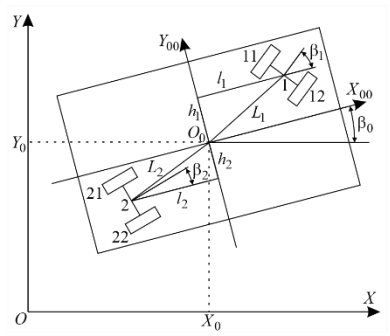


Рис. 1 – Расчётная схема исследуемого колёсного робота

$$\begin{cases} x_{ij}(t) = X_0(t) + (l_i \cdot \cos(\beta_0(t)) - h_i \cdot \sin(\beta_0(t))) - l_{ij} \cdot \sin(\beta_0(t) + \beta_i(t)), \\ y_{ij}(t) = Y_0(t) + (l_i \cdot \sin(\beta_0(t)) + h_i \cdot \cos(\beta_0(t))) + l_{ij} \cdot \cos(\beta_0(t) + \beta_i(t)), \end{cases} \quad (2)$$

(t – время; i – номер приводного блока; j – номер колеса приводного блока i ; $\vec{S}_{ij}(t) = [x_{ij}(t), y_{ij}(t)]^T$ – положение колеса $i j$ в неподвижной системе координат (с.к.) $OXYZ$; l_{ij} – расстояние от точки крепления приводного блока i до центра колеса $i j$; $\beta_i(t)$ – угол положения приводного блока i в подвижной с.к. $O_0X_0Y_0Z_0$) и метода Ньютона-Эйлера, который базируется на балансе сил и моментов:

$$\frac{d\vec{V}_0(t)}{dt} = \frac{\vec{F}_0(t)}{m_0}, \quad \frac{d\vec{\omega}_0(t)}{dt} = \frac{\vec{M}_0(t)}{J_0}, \quad \frac{d\vec{S}_0(t)}{dt} = \vec{V}_0(t), \quad \frac{d\vec{\beta}_0(t)}{dt} = \vec{\omega}_0(t) \quad (3)$$

(m_0 – масса корпуса робота, J_0 – момент инерции корпуса робота относительно оси O_0Z_0 подвижной с.к.; $\vec{F}_0(t)$ – вектор суммы приложенных сил, $\vec{M}_0(t)$ – момент суммы всех сил, относительно оси O_0Z_0 подвижной с.к.; $\vec{\beta}_0(t)$ – угол положения корпуса; $\vec{\omega}_0(t)$ – вектор скорости вращения корпуса; $\vec{S}_0(t)$ – координаты положения корпуса; $\vec{V}_0(t)$ – линейная скорость корпуса).

При движении робота рассматриваемые силы возникают от колёсной системы. По этой причине динамическая часть модели робота включает в себя электродвигатель (ЭД) постоянного тока с постоянными магнитами (ДПТМ), генерирующий приводную силу $\vec{F}_{np}(t)$, и колесо, на которое со стороны поверхности действует сила трения-скольжения $\vec{F}_{mp}(t)$ согласно закону Амонтона. Для колеса $i j$ приводного блока i :

$$\begin{aligned}\omega_{\text{дв}ij}(t) &= \frac{v_{ij}^{xij}(t)}{I_{pij} \cdot R_{kij}}, \quad \frac{di_{\text{я}ij}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{\text{я}ij}} \cdot (u_{\text{ф}ij}(t) - k_{eij} \cdot \omega_{\text{дв}ij}(t) - R_{\text{я}ij} \cdot i_{\text{я}ij}(t)), \\ M_{\text{Д}ij}^{\text{в}yx}(t) &= \frac{k_{mij}}{I_{pij} \cdot \eta_{pij}} \cdot i_{\text{я}ij}(t), \quad F_{\text{н}pij}^{xij}(t) = \frac{M_{\text{Д}ij}^{\text{в}yx}(t)}{R_{kij}}, \\ \vec{F}_{\text{м}pij}^{ij}(t) &= -\mu \cdot |\vec{N}_{ij}(t)| \cdot \frac{\vec{V}_{ij}^{ij}(t)}{|\vec{V}_{ij}(t)|}, \quad \vec{F}_{ij}^{ij}(t) = \vec{F}_{\text{н}pij}^{ij}(t) + \vec{F}_{\text{м}pij}^{ij}(t),\end{aligned}\tag{4}$$

$\omega_{\text{дв}ij}(t)$ – скорость вращения электродвигателя колеса $i j$; $v_{ij}^{xij}(t)$ – проекция линейной скорости колеса на ось $O_{ij}X_{ij}$ локальной с.к. $O_{ij}X_{ij}Y_{ij}Z_{ij}$, связанной с центром колеса; $i_{\text{я}ij}(t)$ – ток якоря; $u_{\text{ф}ij}(t)$ – напряжение фазы; $R_{\text{я}ij}$, $L_{\text{я}ij}$ – сопротивление и индуктивность обмотки; k_{eij} , k_{mij} – конструктивные постоянные двигателя; $M_{\text{Д}ij}^{\text{в}yx}(t)$ – динамический момент на выходе; I_{pij} – передаточное число редуктора; η_{pij} – коэффициент полезного действия редуктора; R_{kij} – радиус колеса; $\vec{F}_{\text{н}pij}^{ij}(t) = [F_{\text{н}pij}^{xij}(t), 0]^T$ – вектор приводной силы; μ – коэффициент трения скольжения; $\vec{N}_{ij}(t)$ – сила реакции опоры; $\vec{V}_{ij}^{ij}(t) = [v_{ij}^{xij}(t), v_{ij}^{yij}(t)]^T$ – проекции линейной скорости колеса $i j$ на оси $O_{ij}X_{ij}$ и $O_{ij}Y_{ij}$ локальной с.к. $O_{ij}X_{ij}Y_{ij}Z_{ij}$; $\vec{F}_{ij}^{ij}(t)$ – вектор суммарной силы, действующей на колесо.

На следующем шаге рассматривается динамика приводного блока, которая формируется из полученных выражений в (4) на основе (3):

$$\begin{aligned}\vec{F}_i^i(t) &= \vec{F}_{i1}^i(t) + \vec{F}_{i2}^i(t), \quad \vec{M}_i(t) = \vec{L}_{i1} \times \vec{F}_{i1}^i(t) + \vec{L}_{i2} \times \vec{F}_{i2}^i(t), \\ \frac{d\bar{\omega}_i(t)}{dt} &= \frac{\vec{M}_i(t)}{J_i}, \quad \frac{d\bar{\beta}_i(t)}{dt} = \bar{\omega}_i(t),\end{aligned}\tag{5}$$

где знаком \times обозначено векторное произведение; $\vec{L}_{i1} = [0, l_{i1}]^T$, $\vec{L}_{i2} = [0, -l_{i2}]^T$ – векторы, соединяющие центры колеса $i j$ с точкой крепления приводного блока i ; $\omega_i(t)$, $\beta_i(t)$ – угловая скорость и угол положения приводного блока i .

На заключительном шаге построения математической модели рассматриваются силы, действующие на корпус робота со стороны приводных блоков:

$$\begin{aligned} \vec{F}_0(t) &= R(-\beta_1(t)) \cdot \vec{F}_1^1(t) + R(-\beta_2(t)) \cdot \vec{F}_2^2(t), \\ \vec{M}_0(t) &= \vec{L}_1 \times \left(R(-\beta_1(t)) \cdot \vec{F}_1^1(t) \right) + \vec{L}_2 \times \left(R(-\beta_2(t)) \cdot \vec{F}_2^2(t) \right), \end{aligned} \quad (6)$$

$R(\alpha)$ – матрица поворота на угол α ; $\vec{F}_0(t)$, $\vec{M}_0(t)$ – вектор суммарной силы и суммарный момент сил. Величины из выражения (6) подставляются в (3) для расчёта углового положения $\beta_0(t)$, скорости вращения $\omega_0(t)$, положения центра $\vec{S}_0(t)$ и линейной скорости $\vec{V}_0(t)$ корпуса робота. Применяя (2), находят координаты $\vec{S}_{ij}(t)$ и линейные скорости колёс $\vec{V}_{ij}(t)$ в глобальной с.к. Для приведения проекций $\vec{V}_{ij}(t)$ к колесу и возможности применения при расчёте динамики электродвигателей (4) используем матрицу поворота $R(\alpha)$ на угол $(\beta_0(t) + \beta_i(t))$:

$$\vec{V}_{ij}^{ij}(t) = R(\beta_0(t) + \beta_i(t)) \cdot \vec{V}_{ij}(t). \quad (7)$$

Выражения (2) – (7) объединяются в единую систему, на основе которой была построена программная модель (рис. 2). Итоговая структура имеет свойства масштабирования – расчёты можно проводить для колёсных роботов с числом приводных блоков больше двух добавлением уравнений кинематики (2) и (7), колёс (4) и приводных блоков (5).

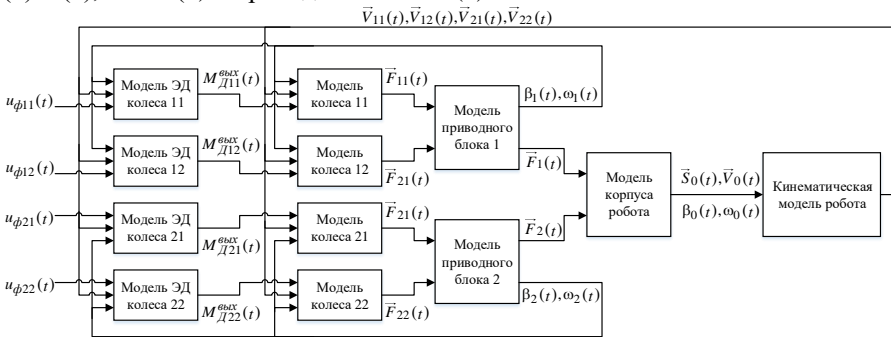


Рис. 2 – Структура программной модели исследуемого колёсного робота

В третьей главе раскрывается построение системы согласованного управления электроприводами рассматриваемого колёсного робота. В начале главы демонстрируется общая структура разрабатываемой системы управления (рис. 3), на вход которой поступает системное задание в виде траектории и заданной контурной скорости. Данная информация, совместно с информацией о положении робота в пространстве (обратная связь), обрабатывается блоком расчёта траекторной ошибки, который передаёт

вычисленные величины отклонений от контура в системный регулятор. Системный регулятор в свою очередь рассчитывает задания скоростей вращения электродвигателей колёс. Локальные регуляторы скорости электродвигателей поддерживают заданную скорость вращения, изменяя напряжения на обмотках двигателей колёс.

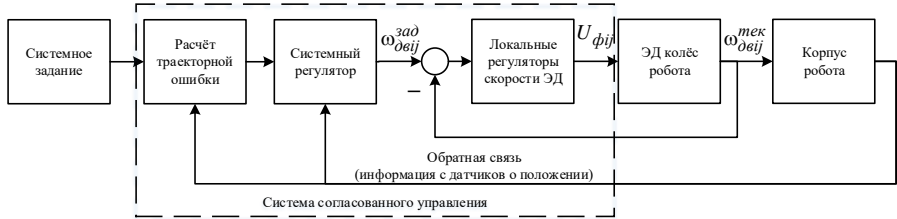


Рис. 3 – Общая структура разрабатываемой системы согласованного управления

Далее рассматриваются отдельные её элементы. Первым раскрывается блок расчёта траекторной ошибки, при построении которого применялось следствие, вытекающее из геометрических свойств объекта: для стабилизации траекторного движения центра корпуса робота достаточно, чтобы точки крепления приводных блоков отклонялись от собственных эквидистантных траекторий к заданной кривой маршрута с минимальной ошибкой.

Исходная кривая маршрута описывается кусочно-непрерывной функцией $f(s)$ в параметрической форме от перемещения s (пройденный путь). Заданный пройденный путь (тот, который необходимо пройти к текущему моменту времени) на текущем временном интервале рассчитывается по формуле:

$$s_i(t) = s_i^*(t) + v_c^{зад}(t) \cdot \Delta t, \quad (8)$$

где i – точка робота (0 – центр корпуса, 1, 2 – приводные блоки 1 и 2); $s_i(t)$, $s_i^*(t)$ – заданный пройденный путь на текущем и предыдущем временном интервале; $v_c^{зад}(t)$ – заданная контурная скорость; Δt – интервал вызова системы управления (период квантования).

Вычислив $s_i(t)$ и $s_i^*(t)$, можно определить заданные координаты точек корпуса робота на текущем и предыдущем временном интервале:

$$\vec{S}_i(s) = [X_i(s), Y_i(s)]^T = \vec{f}(s_i), \quad \vec{S}_i^*(s) = [X_i^*(s), Y_i^*(s)]^T = \vec{f}(s_i^*). \quad (9)$$

Стабилизация контурного движения каждого приводного блока происходит за счёт передачи в системный регулятор векторов продольных и поперечных отклонений от траектории $\Delta \vec{L}_i(s) = [\Delta l_i(s), \Delta h_i(s)]^T$ и заданных углов положения $\beta_i^{зад}(s)$ относительно кривой маршрута.

Расчёт требуемых угловых положений точек корпуса в глобальной с.к. определяется геометрическими свойствами траектории. При вычислении

траекторной ошибки используется разность векторов заданного $\vec{S}_0^{zad}(s) = [X_0^{zad}(s), Y_0^{zad}(s)]^T$ и текущего $\vec{S}_0^{mek}(s) = [X_0^{mek}(s), Y_0^{mek}(s)]^T$ положений центральной точки корпуса.

$$\beta_i^{zad}(s) = \arctan\left(\frac{Y_i(s) - Y_i^*(s)}{X_i(s) - X_i^*(s)}\right), \quad (10)$$

$$\Delta \vec{L}_i(s) = R(\beta_i^{zad}(s)) \cdot \left(\vec{S}_0^{zad}(s) - \vec{S}_0^{mek}(s) + \left(R(-\beta_0^{zad}(s)) - R(-\beta_0^{mek}(s)) \right) \cdot \vec{L}_i \right),$$

где i – номер приводного блока робота; $\beta_0^{mek}(s)$ – текущее угловое положение корпуса робота (информация с датчика); $\vec{L}_i = [l_i, h_i]^T$ – вектор, соединяющий центр корпуса с точкой крепления приводного блока i .

Применяя выражения (10), можно находить задания углового положения и вектор траекторных ошибок любого количества точек робота, что делает возможным внедрение данного блока в системы управления колёсных роботов с большим числом приводных блоков.

Следующий рассматриваемый блок – локальные регуляторы скорости электроприводов, в качестве которых был выбран пропорционально-интегрирующий (ПИ-) регулятор из-за его популярности и реализации в виде готовых программных элементов в промышленных контроллерах.

Настройка локальных регуляторов начинается с рассмотрения передаточной функции электропривода постоянного тока с постоянными магнитами $W_o(s)$, применяемого в работе, и ПИ-регулятора $W_{ПИ}(s)$:

$$W_o(s) = \frac{\omega_{обij}(s)}{U_{фij}(s)} = \frac{k_o}{(1 + T_1 \cdot s) \cdot (1 + T_2 \cdot s)}, \quad W_{ПИ}(s) = K_{II} + \frac{1}{T_{II} \cdot s}, \quad (11)$$

$$k_o = \frac{I_{pij}}{k_{eij}}, \quad T_1 = \frac{2 \cdot T_э}{1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{T_э}{T_m}}}, \quad T_2 = \frac{2 \cdot T_э}{1 + \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{T_э}{T_m}}},$$

где k_o – коэффициент передачи контура скорости; T_1 и T_2 – большая и малая постоянные времени; s – оператор Лапласа; K_{II} – коэффициент усиления пропорционального канала; T_{II} – постоянная времени интегрирующего канала регулятора; T_m , $T_э$ – механическая и электромагнитная постоянные времени.

Настройка контура регулирования производилась методом желаемой передаточной функции $W_{жс}(s)$, в качестве которой взяли используемую при настройке на модульный (технический) оптимум (T_μ – некомпенсируемая постоянная времени):

$$W_{жс}(s) = \frac{1}{1 + 2 \cdot T_\mu \cdot s \cdot (1 + T_\mu \cdot s)}. \quad (12)$$

ПИ-регулятор реализован в программной части системы управления в

инкрементной форме. В промышленных контроллерах для обеспечения безопасной работы существует ограничение на интервал вызова элементов программной части (должен быть не менее 1 – 5 мс в зависимости от производителя и типа ПЛК). В применяемых ДПТМ малая постоянная времени T_2 варьируется в пределах от 0,01 до 2,00 мс. Следовательно, в целях корректной работы системы управления, интегральную составляющую T_{II} и коэффициент усиления K_{II} выбрали таким образом, чтобы они компенсировали влияние T_2 . Иными словами, приняли $T_2 = K_{II} \cdot T_{II}$. Учитывая вышесказанное, вычислили передаточную функцию замкнутого контура управления $W_{зк}(s)$. Выполняя все необходимые преобразования в знаменателе $W_{зк}(s)$ и решая систему уравнений относительно T_{II} , получили формулы для коэффициентов ПИ-регулятора ($W_{рк}(s)$ – передаточная функция разомкнутого контура управления):

$$W_{зк}(s) = \frac{W_{рк}(s)}{1 + W_{рк}(s)} = \frac{W_o(s) \cdot W_{ПИ}(s)}{1 + W_o(s) \cdot W_{ПИ}(s)} = \frac{1}{\frac{T_{II} \cdot T_1}{k_o} \cdot s^2 + \frac{T_{II}}{k_o} \cdot s + 1}, \quad (13)$$

$$T_{II} = 2 \cdot T_1 \cdot k_o, \quad K_{II} = \frac{T_2}{T_{II}}.$$

В конце раздела производится демонстрация работы настроенного на (13) ПИ-регулятора при помощи компьютерного моделирования. Согласно полученным результатам, показатели регулирования сопоставимы с заявленными в модульном оптимуме.

Далее раскрывается построение системного регулятора в трёх различных формах: нелинейной, нечёткой и нейросетевой. Получая информацию о величине заданной контурной скорости ($v_c^{зад}$), отклонениях от траектории (векторы $\Delta \vec{L}_0, \Delta \vec{L}_1, \Delta \vec{L}_2$), заданных ($\beta_0^{зад}, \beta_1^{зад}, \beta_2^{зад}$) и текущих ($\beta_0^{тек}, \beta_1^{тек}, \beta_2^{тек}$) углах положения центра корпуса и приводных блоков, системный регулятор вычисляет задания для каждого локального контура управления скоростью электроприводов колёс ($\omega_{\delta 611}^{зад}, \omega_{\delta 612}^{зад}, \omega_{\delta 621}^{зад}, \omega_{\delta 622}^{зад}$).

При построении системного регулятора применяется метод декомпозиции, что позволило разделить его на несколько составных частей: регулятор корпуса, регуляторы приводных блоков и блок расчёта скоростей электродвигателей колёс.

Регулятор корпуса работа стабилизирует угловое и продольное положения центра корпуса робота. Угловая ошибка $\Delta \beta_0$ компенсируется при помощи задания угловой скорости вращения корпуса, продольная Δl_0 – регулированием контурной скоростью. В нелинейной версии системного регулятора применяются элементы «зона насыщения», в нечёткой – блок

нечёткой логики, в нейросетевом – специальный нейрон стабилизации углового положения и нелинейный элемент типа «зона насыщения» для управления контурной скоростью.

Регулятор приводного блока i компенсирует угловую ошибку $\Delta\beta_i$ приводного блока относительно корпуса и уменьшает его поперечное отклонение Δh_i от траектории, регулируя угловую скорость вращения относительно точки крепления. Аналогично регулятору корпуса в нелинейном системном регуляторе данный элемент включает в себя зону насыщения, в нечётком системном регуляторе используется блок нечёткой логики, а в нейросетевом – нейрон, соединённый с нейроном корпуса и соответствующими входами нейросети.

Блок расчёта заданий скоростей электроприводов колёс строится на основе информации о характере движения колеса: в процессе перемещения робота вдоль траектории колесо совершает сложное движение, при котором переносным является перемещение корпуса робота, а относительным – вращение приводного блока относительно точки крепления. Составив выражение для вектора линейной скорости колеса $i j$ приводного блока i , раскрыв его и выписав продольную составляющую, получим задание линейной скорости v_{ij}^{zad} , которое, приведя к валу электродвигателя, преобразуется в заданную скорость вращения электропривода колеса, которая будет передана в систему локального регулирования:

$$v_i^{zad} = V_0^K \pm \omega_0^K \cdot |\bar{L}_i|, \quad v_{ij}^{zad} = v_i^{zad} \mp \omega_{0i}^K \cdot l_{ij}, \quad \omega_{\delta ij}^{zad} = \pm \frac{v_{ij}^{zad}}{I_{pij} \cdot R_{kij}}, \quad (14)$$

v_i^{zad} – заданная линейная скорость приводного блока i с учётом корректировки линейной и угловой скорости корпуса; ω_0^K , V_0^K – задания угловой и продольной скорости корпуса робота с учётом корректировки (выходы регулятора корпуса); $|\bar{L}_i|$ – модуль вектора \bar{L}_i (расстояние от центра корпуса до точки крепления приводного блока i) (Знак перед ω_0^K берётся согласно знаку h_i – продольная составляющая \bar{L}_i); ω_i^K – итоговая величина задания скорости вращения приводного блока i (выход регулятора приводного блока); $\omega_{0i}^K = (\omega_0^K + \omega_i^K)$ – суммарная угловая скорость точки крепления приводного блока i ; l_{ij} – расстояние, соединяющее точку крепления приводного блока i и колесо $i j$ (знак у l_{ij} определяется по «правилу правой руки»); знак $\omega_{\delta ij}^{zad}$ берётся обратный знаку l_{ij} .

Масштабируемость системного регулятора достигается добавлением дополнительных регуляторов или нейронов приводных блоков и выражений в (14) для новых приводных блоков и колёс. Общая структура системного

регулятора представлена на рис. 4. Итоговая форма позволяет производить замену типа системного регулятора без каких-либо преобразований для остальных элементов системы согласованного управления электроприводами.

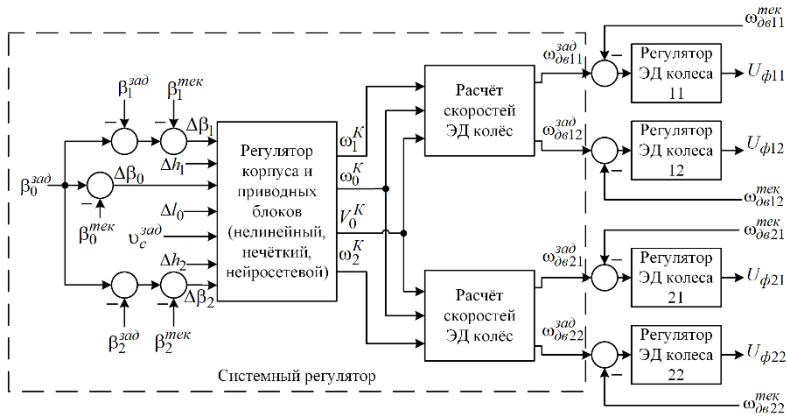


Рис. 4 – Общая структура системного регулятора

После построения системного регулятора происходит его настройка, которая производится при помощи параметрической оптимизации. В общем случае задачу параметрической оптимизации можно описать как поиск среди параметров системы k множества X такого набора параметров k^* , что $f(k^*) = \min_{k \in X} f(k)$, где $f(\cdot)$ – целевая функция (отображение $f: X \rightarrow R$). При

постановке задачи оптимизации необходимо определиться с допустимым множеством параметров системы, целевой функцией и критерием поиска. Для данной задачи допустимым множеством параметров системного регулятора может быть набор строго положительных вещественных чисел $X = \{k \in \mathbb{R}^n \mid k_i > 0\}$.

Целью исследования является повышение добротности воспроизведения траектории системы управления колёсным роботом, которую, при фиксированной контурной скорости, можно достичь уменьшением отклонения от траектории. Также необходимо учесть требование к точности углового позиционирования, то есть минимальное отклонение углового положения корпуса робота от заданного. По этим причинам вводятся две целевые функции: $f_c(k)$ – квадрат с.к.о. контурной ошибки, и $f_\beta(k)$ – квадрат с.к.о. ошибки углового положения. Функциям $f_c(k)$ и $f_\beta(k)$ соответствуют критерии минимальности, обозначенные $I_c(k) = \min_{k \in X} f_c(k)$ и $I_\beta(k) = \min_{k \in X} f_\beta(k)$.

При обучении (тренировке) нейронных сетей часто используют пакетный способ, суть которого заключается в тренировке нейронной сети на всех обучающих выборках одновременно до момента её окончания. Данный способ

применяется и в данной задаче. Пакеты формируются из наборов траекторий с различными заданными контурными скоростями. В результате получим последовательность из нескольких минимизируемых целевых функций, что приводит к задаче многокритериальной оптимизации:

$$\tilde{I}_D = I_D(\varepsilon_{c1}^2(k), \dots, \varepsilon_{cn}^2(k), \varepsilon_{\beta 1}^2(k), \dots, \varepsilon_{\beta n}^2(k)) \rightarrow \min, \quad (15)$$

где ε_{ci}^2 , $\varepsilon_{\beta i}^2$ – квадрат с.к.о. контурной ошибки и квадрат с.к.о. углового позиционирования при испытании на заданной контурной скорости i ; n – количество испытаний в одном мини-пакете (заданной траектории).

Для решения (15) использовалась линейная свёртка критериев:

$$\tilde{I}_D = \sum_{i=1}^n (\alpha_{ci} \cdot f_{ci}(k) + \alpha_{\beta i} \cdot f_{\beta i}(k)) = \sum_{i=1}^n (\alpha_{ci} \cdot \varepsilon_{ci}^2(k) + \alpha_{\beta i} \cdot \varepsilon_{\beta i}^2(k)) \rightarrow \min, \quad (16)$$

$$A = \left\{ \alpha \in \mathbb{R}^n \mid \alpha_{ci}, \alpha_{\beta i} > 0, \left(\sum_{i=1}^n \alpha_{ci} + \sum_{i=1}^n \alpha_{\beta i} \right) = 1 \right\},$$

где A – множество весовых коэффициентов частных критериев; α_{ci} , $\alpha_{\beta i}$ – вес критерия i контурной ошибки и углового позиционирования соответственно, принадлежащие множеству A .

Критерий (16) называется взвешенной суммой критериев или аддитивной формой свёртки критериев. Веса α_{ci} и $\alpha_{\beta i}$ приняты равными $\alpha_{ci} = \alpha_{\beta i} = \frac{1}{2 \cdot n}$ по причине равной степени важности результатов всех испытаний и по траекторной ошибке, и по угловому отклонению. Приведённое в диссертации доказательство демонстрирует существование минимума (16) в точке $I_D^*(0, \dots, 0, 0, \dots, 0)$.

Для решения задачи параметрической оптимизации применялся метод сопряжённых градиентов в форме Полака-Райбера, который производит движение вдоль ортогонального направления к полученным на предыдущих шагах. Величина шага движения к минимуму определяется через решение одномерной задачи поиска экстремума целевой функции вдоль нового направления комбинированным методом Брента, который сочетает использование метода золотого сечения и метода парабол. Результаты моделирования показывают, что применение рассмотренных алгоритмов параметрической оптимизации способно уменьшить траекторную ошибку или исходное неустойчивое движение сделать устойчивым.

В конце главы построена общая структура аппаратной части системы согласованного управления и даны рекомендации по подбору оборудования (расчёт количества аккумуляторов, выбор автоматических выключателей, контакторов, драйверов электродвигателей, преобразователей напряжения).

В четвёртой главе приведены результаты численных и натуральных исследований процесса управления электроприводами колёсного робота. Предоставленный макет массой 450 кг, длиной 2 м и шириной 1 м

представляет из себя продольно-симметричную конфигурацию колёсного робота с двумя дифференциальными приводными блоками. В качестве аппаратуры системы управления используется промышленное оборудование: ПЛК, промышленное навигационное устройство типа лидар, специализированные датчики скорости вращения колёс и положения приводных блоков, драйверы электродвигателей в промышленном исполнении.

Численные эксперименты заключались в применении параметрической оптимизации системных регуляторов в рассмотренных формах (нелинейный, нечёткий и нейросетевой) на математической модели колёсного робота.

На шаге натуральных исследований полученные коэффициенты системных регуляторов внедрялись в реализованную систему управления (также в трёх формах) с последующим запуском макета и фиксацией основных параметров контурного движения на двух траекториях (представлены на рис. 5). Дополнительно были произведены численные эксперименты при начальных условиях натуральных экспериментов с целью оценки адекватности модели, а также замеры времени расчёта управляющего воздействия (от входа в блок расчёта траекторной ошибки до выхода ПИ-регулятора скорости электродвигателя) для всех видов системного регулятора на 10 различных устройствах.

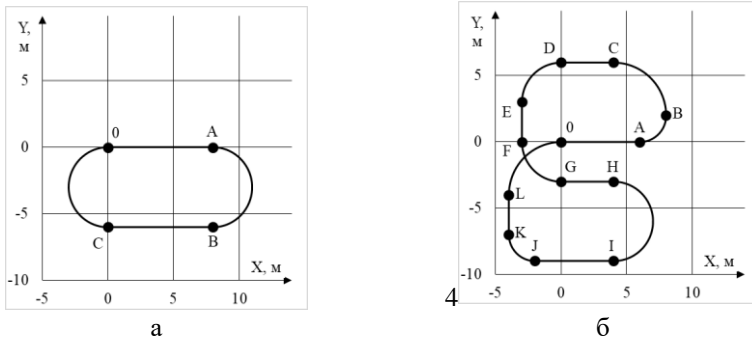
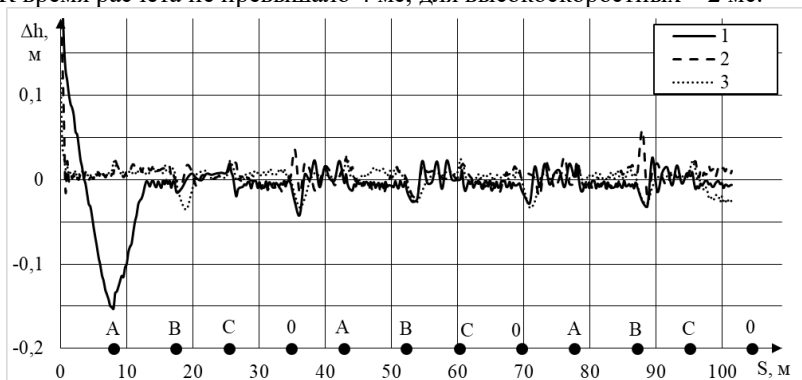


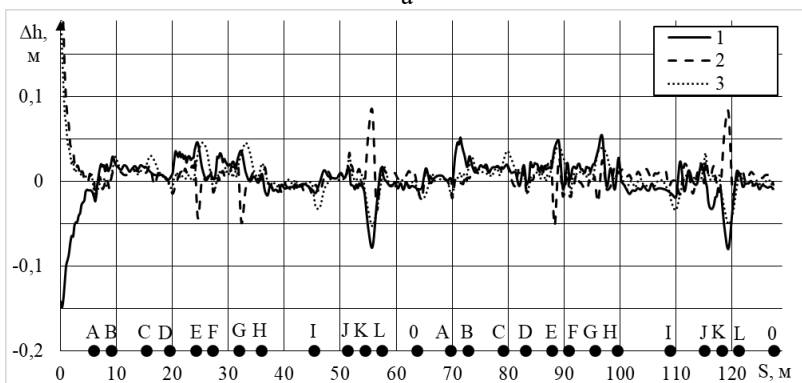
Рис. 5 – Траектории, используемые в натуральных экспериментах:
 а – Траектория №1; б – Траектория №2

Результаты экспериментальных исследований (продемонстрированы на рис. 6) говорят о возможности применения разработанной системы согласованного управления для продольно-симметричной конфигурации роботов с дифференциальными приводными блоками. Система управления с нечётким и нейросетевым системным регулятором показали добротность воспроизведения траектории в 1,5 раза больше (в среднем $33,0 \frac{1}{с}$), чем у системы с нелинейным (в среднем $25,0 \frac{1}{с}$). Отклонение от траектории не превышает 8 см. При этом системы с нелинейным и нейросетевым

регуляторами работали в 2 раза быстрее, чем система с нечётким. Максимальное время расчёта управляющих воздействий для низкоскоростных ПЛК время расчёта не превышало 4 мс, для высокоскоростных – 2 мс.



а



б

Рис. 6 – График поперечного отклонения центра корпуса Δh от пройденного пути S при проведении натуральных исследований: а – для траектории №1; б – для траектории №2; 1 – для нелинейного системного регулятора; 2 – для нечёткого системного регулятора; 3 – для нейросетевого системного регулятора

Результаты повторных численных экспериментов показали очень большое отличие от результатов натуральных. Так, графики перемещения были с значительно меньшими отклонениями (не превышает 3 см), движение более плавное, а показатель добротности воспроизведения траектории в 2 – 4 раза превышал значения реальной системы. Такое отличие объясняется отсутствием в модели учёта внешних факторов (неровность поверхности, погрешности конструкции и другое), которые негативно влияют на процесс движения. Но, несмотря на это, математическая модель смогла предсказать характер движения (такие как «виляние» корпуса при использовании нелинейного системного регулятора), а результаты параметрической

оптимизации при помощи неё оказались достаточными для устойчивого движения реального робота.

В конце главы даны рекомендации по выбору структуры и реализации разработанной системы согласованного управления.

В заключении приведены основные результаты работы и даны рекомендации по расширению данного исследования.

В приложениях приведены доказательство наличия экстремума критерия оптимизации, электрическая схема экспериментальной установки, акт о внедрении результатов, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Получена масштабируемая и модифицируемая математическая модель сложной неголономной динамической системы четырёхколёсного мобильного робота с дифференциальными приводными блоками сочетанием уравнений кинематики и метода Ньютона-Эйлера.

2. Синтезирована система согласованного управления электроприводами колёс, состоящая из блока расчёта траекторной ошибки, системного регулятора в трёх различных взаимозаменяемых формах и локальной подсистемы управления электроприводами с предлагаемым способом расчёта коэффициентов регуляторов скорости. Все элементы системы можно применить для колёсных роботов с несимметричной компоновкой и числом приводных блоков отличным от двух. Предложен способ настройки локальных регуляторов скорости электроприводов, который должен обеспечить значение показателя перерегулирования переходного процесса по скорости в 4,3% от заданного.

3. Выведен критерий и выбраны методы оптимизации системных регуляторов для предварительной настройки. Численные эксперименты на математической модели показали возможность применения оптимизации для улучшения качества регулирования.

4. Проведены натурные эксперименты, показывающие возможность использования результатов диссертационного исследования. По результатам натурных экспериментов было установлено, что система управления с нелинейным системным регулятором обладает меньшей добротностью воспроизведения траектории, чем аналогичная система с нечётким и нейросетевым (примерно в 1,5 раза). Максимальное отклонение от траектории не превышает 8 см.

5. При сравнении результатов повторных численных экспериментов с результатами натурных экспериментов были замечены большие отличия в графиках траектории робота и значении добротности воспроизведения траектории. Данный факт никак не сказался на качестве регулирования, коэффициенты, полученные в результате параметрической оптимизации на данной модели, оказались применимы для реального объекта.

6. Произведён анализ времени работы полученной системы управления с различными системными регуляторами при различной аппаратной части, который установил, что система управления с нелинейным системным регулятором работает в 2 раза быстрее, чем с нечётким. Система с нейросетевым регулятором работает немного дольше системы с нелинейным регулятором.

7. Даны рекомендации по реализации системы согласованного управления электроприводами колёсного робота.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендуемые ВАК

1. Мешковский, Е.О. Построение математической модели четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев // Инновации и Инвестиции. – 2020. – №2. – С. 113-118.

2. Мешковский, Е.О. Построение траектории программного движения в системе согласованного управления электроприводами четырехколесного мобильного робота / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – №4 (106). – С. 68-71.

3. Мешковский, Е.О. Нелинейное взаимосвязанное управление электроприводами четырёхколёсного мобильного робота / Е.О. Мешковский, В.Я. Фролов, А.Д. Курмашев // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – №6. – С. 23-31.

4. Мешковский, Е.О. Нечёткое согласованное управление системой электроприводов четырёхколёсного мобильного робота / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев, В.Я. Фролов // Доклады ТУСУР. – 2020. – №3 (23). – С. 61-69.

5. Мешковский, Е.О. Параметрическая оптимизация системного регулятора согласованного управления электроприводами четырёхколёсного мобильного робота / Е.О. Мешковский // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2020. – №8/2. – С. 58-63.

Статьи в журналах, индексируемые в системе цитирования SCOPUS

6. Meshkovskiy, E.O. Nonlinear control of electric drive system of a four-wheel mobile robot with two differential drive units / E.O. Meshkovskiy, V.Ya. Frolov, A.D. Kurmashev // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). – 2020. – №1753 (1). – С. 1031.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

7. Свидетельство 2020613682. «Программа для моделирования режимов работы нелинейной системы согласованного управления электроприводами четырёхколёсного мобильного робота» : программа для ЭВМ / Е.О. Мешковский (RU); правообладатель Е.О. Мешковский. № 2020612339; заявл. 03.03.2020; опубл. 19.03.2020, Бюл. № 3. 93 Кб.

8. Свидетельство 2020665932. «Программа для моделирования режимов

работы нечёткой системы согласованного управления электроприводами мобильного робота» : программа для ЭВМ / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев, В.Я. Фролов (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «СПбПУ». № 2020664441; заявл. 19.11.2020; опубл. 02.12.2020, Бюл. № 12. 94 Кб.

9. Свидетельство 2020665115. «Программа для моделирования режимов работы нейросетевой системы согласованного управления электроприводами мобильного робота» : программа для ЭВМ / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев, В.Я. Фролов (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «СПбПУ». № 2020664484; заявл. 19.11.2020; опубл. 23.11.2020, Бюл. № 12. 91 Кб.

10. Свидетельство 2020665487. «Программа для проведения параметрической оптимизации системного регулятора согласованного управления электроприводами мобильного робота» : программа для ЭВМ / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев, В.Я. Фролов (RU); правообладатель ФГАОУ ВО «СПбПУ». № 2020664510; заявл. 19.11.2020; опубл. 27.11.2020, Бюл. № 12. 81 Кб.

Личный вклад автора в публикациях, выполненных в соавторстве: в работе [1] автор построил математическую модель объекта, произвёл масштабирование данной модели, построил и реализовал программную модель объекта, произвёл численные эксперименты; в работе [2] автору принадлежит предположение о характере движения элементов корпуса объекта, решение геометрических задач, связанных с движением точек объекта в пространстве, масштабирование блока контроля траектории, численные эксперименты; в работах [3, 4] автор разработал общую концепцию системных регуляторов, произвёл их масштабирование, провёл численные эксперименты; в работе [6] автор провёл численные эксперименты, подготовил перевод материалов на иностранный язык; в работах [8, 9, 10] автор формализовал задачу, разработал алгоритм, произвёл системное программирование, создал части исходного кода программы