

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»  
Институт энергетики  
Высшая школа электроэнергетических систем

На правах рукописи

**Мешковский Евгений Олегович**

**СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
ЧЕТЫРЁХКОЛЁСНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

Направление подготовки  
13.06.01 «Электро- и теплотехника»

Направленность  
13.06.01\_03 «Электротехнические комплексы и системы»

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор В.Я. Фролов

Научный консультант:  
кандидат технических наук,  
доцент А.Д. Курмашев

Санкт-Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в высшей школе электроэнергетических систем института энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор высшей школы: кандидат технических наук, доцент  
Зверев Сергей Геннадьевич

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Фролов Владимир Яковлевич

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент  
Курмашев Арон Даутханович

Официальные рецензенты: Кожубаев Юрий Нургалиевич  
кандидат технических наук  
Управление механизации (филиал ОАО  
«Метрострой»), заместитель главного инженера

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

В последние годы развития промышленности увеличивается процент внедрения в производственный процесс специальных промышленных автоматизированных систем, к которым относятся промышленные конструкции колёсных роботов, так называемые автоматически управляемые транспортные средства (AGV – от англ. Automated (Automatic) Guided Vehicle). Их применение обуславливается большим количеством положительных факторов – увеличение эффективности производства и производительности предприятия, избавление человека от тяжёлого монотонного труда, сохранение жизни и здоровья работника в неблагоприятных условиях, возможность организации конвейерного производства без применения конвейерных систем и многое другое.

При увеличении числа приводных колёс (непосредственно соединённых с электродвигателем), колёсный робот становится многосвязным объектом управления из-за образовавшихся в нём внутренних связей (физической природы) между отдельными электроприводами. Также, внутренняя многосвязность при наличии неблагоприятных условий (неровность поверхности, кинематические погрешности при сборке конструкции, большие массогабаритные показатели и мн. др.) может сильно ухудшить качество регулирования, что приведёт к снижению показателей эффективности внедрения AGV. По этим причинам для такого класса объектов принято разрабатывать специальные системы согласованного управления, учитывающие указанные связи, с целью координации работы приводных колёс для осуществления равномерного перемещения робота вдоль контура.

Многие проблемы уже решены в работах российских (С.А. Берестовой, С.Ф. Бурдакова, Р.Ф. Гилимьянова, А.И. Дивеева, В.В. Евграфова, К.С. Ефремова, А.А. Колесникова, А.Д. Курмашева, И.В. Мирошника, Г.А. Нефедова, О.А. Перегудовой, А.В. Пестерева и др.) и зарубежных (G. Bastin, С. Saceres, G. Campion, M. Hashimoto, J.M. Rosario, K. Takahashi, B. Tarvirdizadeh и др.)

исследователей при помощи построения нейроадаптивных, нечётких, а также комбинацией различных типов систем регулирования, которые требуют большие вычислительные ресурсы. Во многих случаях применения AGV в промышленности, разработчик систем управления, к большому сожалению, ограничен в выборе оборудования аппаратной части и, как следствие, жёстко ограничен в вычислительных ресурсах. Данный факт приводит к необходимости таких разработок, которые будут способны поддерживать необходимое качество управления электроприводами мобильного робота при ограниченных ресурсах аппаратной части. Также, несмотря на достаточную проработанность темы, в большинстве исследований не учитываются указанные свойства аппаратной части системы управления, несимметричность элементов конструкции объекта. Помимо этого, наш объект исследования ранее не был упомянут в научных работах.

Таким образом, научно-квалификационная работа посвящена решению актуальной проблемы согласованного управления электроприводов промышленного четырёхколёсного робота с двумя дифференциальными приводными блоками.

### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования в научно-квалификационной работе является промышленный четырёхколёсный мобильный робот с двумя дифференциальными приводными блоками. Предмет исследования – применение системы согласованного управления электроприводами колёсных роботов с дифференциальными приводными блоками для увеличения добротности воспроизведения траектории при условии ограниченных ресурсов аппаратной части.

### **Цель и задачи исследования**

Главная цель научно-квалификационной работы заключается в повышении эффективности управления системой электроприводов промышленного четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками на основе построения системы согласованного управления. Для оценки эффективности построенной системы управления будет использоваться критерий

добротности воспроизведения траектории.

Поставленная цель будет достигнута при выполнении следующих задач:

1. построить математическую модель четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками;
2. синтезировать систему согласованного управления электроприводами объекта исследования на базе нелинейной, нечёткой и нейросетевой структуры;
3. определить критерий и выбрать метод параметрической оптимизации системных регуляторов;
4. реализовать синтезированные системы согласованного управления на аппаратной базе исследуемого объекта;
5. провести численные и натурные эксперименты при различных структурах систем согласованного управления с оценкой качества регулирования по критерию максимума добротности воспроизведения траектории;
6. проанализировать затрачиваемые вычислительные ресурсы, требуемые для работы спроектированных систем согласованного управления, при различной аппаратной части.

### **Методы исследования**

Для достижения поставленной цели и выполнения поставленных задач в работе применяются методы теории управления линейных, нелинейных и дискретных систем, теории электроприводов, теории нечётких множеств, теории искусственных нейронных сетей, линейной алгебры, многомерного анализа, теоретической и прикладной механики, теории и практики построения информационно-измерительных и управляющих систем. Достоверность полученных результатов обеспечивалась аналитическими, численными и экспериментальными методами верификации предлагаемых решений.

### **Научная новизна**

Научно-квалификационная работа содержит:

1. математическую и программную модель четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками;
2. система согласованного управления электроприводами колёсного робота,

- структура которой позволяет производить замену системного регулятора;
3. система расчёта траекторной ошибки для отдельных точек колёсного робота;
  4. нелинейный, нечёткий и нейросетевой системные регуляторы для роботов с дифференциальными приводными блоками.
  5. методика расчёта коэффициентов локальных регуляторов скорости подсистемы электроприводов;
  6. критерий параметрической оптимизации системного регулятора с указанием комбинации методов.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Результаты научно-квалификационной работы могут использоваться:

1. для ускорения внедрения системы управления электроприводами четырёхколёсного мобильного робота с дифференциальными приводными блоками;
2. для выбора структуры системы согласованного управления электроприводами мобильного робота с дифференциальными приводными блоками;
3. для определения конфигурации аппаратной части системы управления колёсного робота с дифференциальными приводными блоками.

### **Апробация результатов работы**

Основные материалы и результаты научно-квалификационной работы 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; III 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.

### **Публикации**

Основные результаты работы опубликованы в 16 работах, из них 5 статей в научно-рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Представление научного доклада: основные положения**

На защиту выносятся следующие положения:

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 и системными регуляторами трёх типов (нелинейный, нечёткий и нейросетевой);
3. критерий и комбинация методов параметрической оптимизации системных регуляторов.

Результаты исследования являются обоснованными и подтверждаются современными методами численного моделирования, экспериментальной апробацией разработанных систем управления, печатными публикациями.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений.

Во введении раскрывается актуальность темы научно-квалификационной работы, предмет и объект исследования, показана научная новизна и практическая значимость, поставлены цели и задачи работы.

### **Анализ проблемы, обзор существующих решений и постановка задачи**

Первая глава посвящена анализу проблемы, произведён обзор существующих решений и постановка задач исследования.

При анализе применения промышленных колёсных роботов были рассмотрены основные их конструкции и сферы применения. Было указано, что для объектов такого типа разработан специальный международный стандарт ISO 3691-4 [35], который содержит требования к режимам работы, техническом обслуживанию, правила транспортировки грузов и людей и др. Рассмотренные исследования показывают положительные факторы внедрения AGV в производственный процесс предприятий [14, 34, 44]. Также, представлено упрощённое описание объекта исследования – промышленный колёсный робот нагружаемого типа (Unit Load AGV) – и его особенность – наличие двух дифференциальных приводных блоков, способных вращаться относительно точки крепления, и каждый из которых содержит по два электродвигателя, соединённых с колёсами через редукторы. Упрощённая трёхмерная модель конструкции изображена на Рисунке 1.

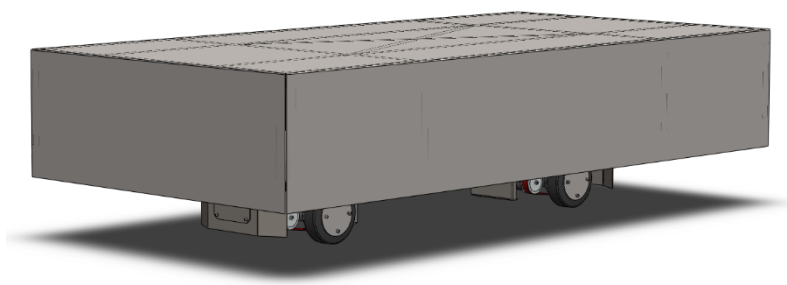


Рисунок 1 – Упрощённая трёхмерная модель исследуемого колёсного робота



Рассмотренные требования к промышленным системам управления, среди которых межгосударственный стандарт МЭК 38-83 «Стандартные напряжения» [7] и государственный стандарт ГОСТ 24.104–85 «Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления. Общие требования» [6], показывают необходимость применения промышленного оборудования при внедрении систем управления в предприятия. К такому типу оборудования относятся специализированные промышленные драйверы электроприводов, промышленные системы навигации и промышленные программируемые логические контроллеры (ПЛК). Системы управления реализуются в программной части ПЛК, которая подчиняется международному стандарту МЭК 61131-3 «Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования» [8], вносящий ряд ограничений при реализации указанных систем управления, что не даёт возможности применить многие разработанные методы из-за их ресурсоёмкости, сложности преобразований и мн. др.

Т. к. рассматриваемая система управления относится к контурному типу, то следующим шагом было введение критерия эффективности их работы – добротность воспроизведения траектории  $D_{v,\varepsilon}$  [16, с. 1]:

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

$v_c$  – контурная скорость (заданная скорость перемещения);  $\varepsilon_c$  – контурная ошибка (среднеквадратичное отклонение (с.к.о.) от траектории).

Критерий (1) в идеальном случае должен стремиться к бесконечности, что невозможно в реальном мире. Поэтому был введён практический критерий эффективности работы реальных контурных систем, заключающийся в максимуме добротности воспроизведения траектории. В наших задачах рассмотренный критерий можно достичь 1) увеличением контурной скорости  $v_c$  с сохранением величины контурной ошибки  $\varepsilon_c$ ; и 2) увеличением контурной скорости  $v_c$  с уменьшением величины контурной ошибки  $\varepsilon_c$ .

При рассмотрении особенностей организации технологического процесса колёсных роботов на предприятиях было выявлено, что увеличение  $D_{0,\varepsilon}$  за счёт указанных способов благоприятно сказывается на работе предприятия благодаря уменьшению парковочных мест для AGV, затрат на их обслуживание и приобретение, а также наличию запаса добротности воспроизведения траектории, который можно использовать при модернизации производства.

Проведённый анализ литературы демонстрирует отсутствие готовых разработок, соответствующих нашим требованиям. Большинство из них посвящено управлению электроприводами колёсных роботов автомобильной конструкции [18, 24] и конструкциям с одним дифференциальным приводным блоком [2, 11, 23, 33, 43]. Также, предлагаемые способы управления в общей форме являются слишком громоздкими и их невозможно или достаточно сложно реализовать на предлагаемом оборудовании. Рассмотренные способы вынесения сложных вычислений на удалённое устройство и передачу управляющих воздействий при помощи беспроводных каналов связи [26, 31, 36] невозможно применить из-за требований к безопасности промышленных систем управления. Проведённый дополнительный анализ литературы [3, 5, 41, 42, 45] показал отсутствие готовых математических моделей для колёсных роботов с большим числом дифференциальных приводных блоков.

Всё вышесказанное позволило подтвердить актуальность темы исследования и произвести более расширенную постановку задачи.

### **Построение математической модели исследуемого колёсного робота**

Вторая глава научно-квалификационной работы посвящена построению математической модели объекта исследования.

При выводе математической модели объект исследования рассматривался как система абсолютно твёрдых тел (корпус, приводные блоки, колёса, электроприводы (в нашем случае, постоянного тока с постоянными магнитами (ДПТМ)) и сосредоточенная масса). Движение колёсного робота рассматривалось как плоское по ровной поверхности. Используется при построении обобщённая

расчётная схема представлена на Рисунке 2, на котором приняты следующие обозначения:  $OXYZ$  – глобальная система координат (неподвижная),  $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$  – локальная система координат, связанная с центром симметрии корпуса робота (подвижная); 1, 2 – точки крепления приводных блоков к корпусу; 11, 12, 21, 22 – колёса робота;  $L_1 = [l_1, h_1]^T$ ,  $L_2 = [l_2, h_2]^T$  – проекции векторов, соединяющие центр корпуса  $O_0$  с точками крепления приводных блоков 1 и 2, на оси с.к.  $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$ ;  $S_0 = [X_0, Y_0]^T$  – координаты центра корпуса робота в глобальной с.к.  $OXYZ$ ;  $\beta_0$  – угол положения корпуса робота (между с.к.  $OXYZ$  и  $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$ );  $\beta_1, \beta_2$  – углы положения приводного блока 1 и 2 относительно корпуса (в подвижной с.к.  $O_0X_{00}Y_{00}Z_{00}$ ).

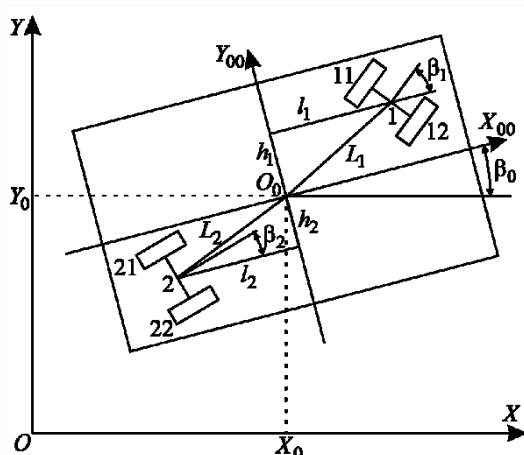


Рисунок 2 – Расчётная схема исследуемого четырёхколёсного робота

Вывод математической модели происходил с построения уравнений кинематических связей колёс, к которым относятся выражения для центра масс каждого колеса, в зависимости от их расположения относительно центра корпуса, и их скоростей. При выводе динамической составляющей модели используется метод Ньютона-Эйлера [40, с. 272-274]. Данный метод использует баланс сил и моментов элементов конструкции, что позволяет учесть все их силомоментные взаимодействия.

Далее рассматривалась модель динамики ДПТМ [20, с.38-39], используемые в приводных колёсах, и самих приводных колёс. Взаимодействие между ними

происходит через момент на валу электродвигателя, который образуется динамическим моментом привода в зависимости от напряжения фазной обмотки и моментом сопротивления. Для учёта неголономности рассматриваемого объекта было введено сопротивление от поверхности перемещение – сила трения скольжения по закону Амонтона [25, с.101-102] в проекциях на ось колеса. Результатом расчётов является суммарная сила, действующая на колесо.

Далее производится рассмотрение приводного блока. Приводной блок состоит из двух колёс, на каждый из которых действует своя суммарная сила. Оба колеса воздействуют на приводной блок, образуя суммарную силу, действующую на сам приводной блок, и момент вращения относительно точки крепления. Данные величины являются результатом расчётов динамики приводного блока.

Приводные блоки воздействуют на корпус робота. Это в свою очередь образует суммарную силу корпуса и момент вращения корпуса относительно центра. Указанные величины позволяют вычислить положение в пространстве, угловое положение, линейную скорость и угловую скорость центра корпуса. Данные характеристики дают возможность применить уравнения кинематических связей для определения положения и линейных скоростей всех колёс робота.

Приведя все расчёты к форме Коши [29, с.119], построили и реализовали компьютерную модель объекта исследования (Рисунок 3), которая впоследствии поможет проводить численные (компьютерные) эксперименты.

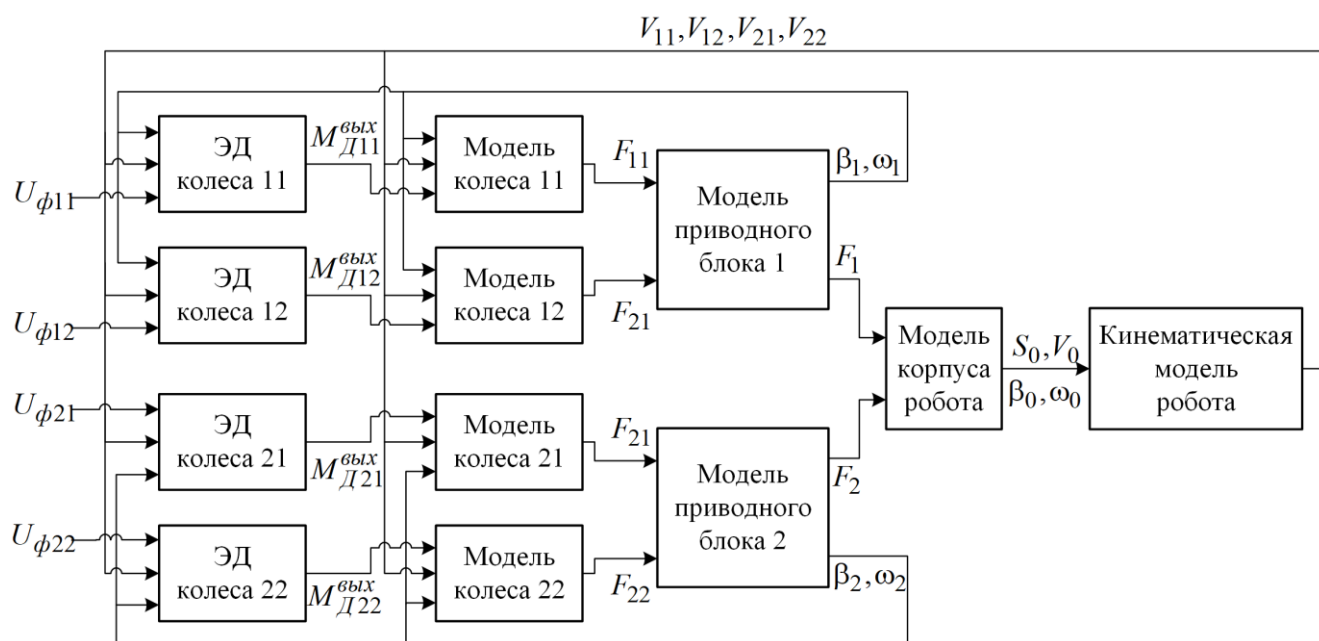


Рисунок 3 – Структура программной модели исследуемого четырёхколёсного робота

На рисунке 3 обозначены:  $U_{\phi ij}$  – напряжения фаз электродвигателя колеса  $i j$ ;  $M_{Дij}^{вых}$  – момент на выходе редуктора электродвигателя колеса  $i j$ ;  $F_{ij}$  – вектор суммарной силы колеса  $i j$ ;  $\beta_i, \omega_i$  – угловое положение и угловая скорость приводного блока  $i$ ;  $F_i$  – вектор суммарной силы приводного блока  $i$ ;  $S_0, V_0$  – положение в пространстве и линейная скорость центра корпуса;  $\beta_0, \omega_0$  – угловое положение и угловая скорость центра корпуса;  $V_{ij}$  – линейная скорость колеса  $i j$ .

Итоговая структура математической модели возможно применять для расчётов поведения колёсных роботов с несимметричной конструкцией приводных блоков и с числом таких блоков больше двух, применяя свойства масштабируемости.

### **Построение системы согласованного управления электроприводами колёсного робота**

Третья глава научно-квалификационной работы посвящена построению системы согласованного управления электроприводами колёс.

#### ***Структура проектируемой системы согласованного управления***

Первым шагом было определение структуры разрабатываемой системы

управления. Было определено, что для стабилизации контурного движения исследуемого колёсного робота необходимо разработать блок расчёта траекторной ошибки, системный регулятор и определиться с типом локальных регуляторов скоростей электродвигателей. Общая структура представлена на Рисунке 4, на котором обозначены:  $\omega_{ij}^{зад}$ ,  $\omega_{ij}^{тек}$  – заданная и текущая скорость электродвигателя колеса  $i j$ ;  $U_{\phi ij}$  – напряжения фаз электродвигателя колеса  $i j$ .

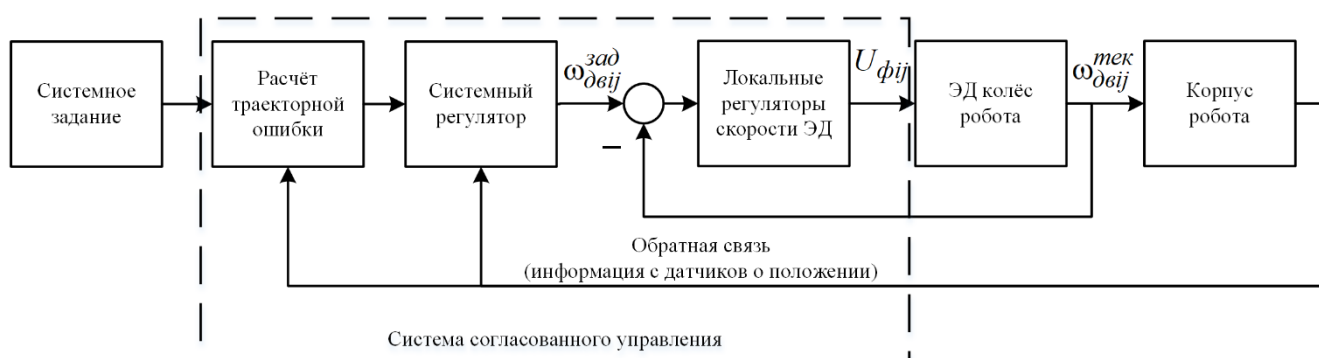


Рисунок 4 – Общая структура разрабатываемой системы согласованного управления исследуемого колёсного робота

### ***Расчёт траекторной ошибки***

Построение системы согласованного управления электроприводами было начато с разработки блока расчёта траекторной ошибки. Рассмотренные исследования были нацелены на стабилизацию только центра корпуса робота [4, 15]. При больших массогабаритных показателях робота такой подход может неблагоприятно сказаться на контурном движении, из-за чего было принято решение использовать способ, вытекающий из геометрических свойств объекта управления: для стабильного контурного движения достаточно, чтобы каждая точка крепления приводного блока перемещалась вдоль заданной траектории с минимальным отклонением. При несимметричном расположении приводных блоков возникает необходимость построения эквидистантных кривых к основной кривой маршрута, что также вносит ограничения на применение рассмотренных методов.

Траектория должна описываться кусочно-непрерывной функцией от пройденного пути  $f(s)$  в параметрической форме и обладать рядом ограничений:

должна быть непрерывной, не иметь точек разрыва и значения функции в точке сопряжения кривых должны быть равны  $f_{i-1}(s_{i-1}) \equiv f_i(s_{i-1})$ , где  $f_{i-1}(s_{i-1})$ ,  $f_i(s_{i-1})$  – описание траектории на  $i-1$  и  $i$  участке соответственно;  $s_{i-1}$  – значение пути, при котором сопрягаются траектории  $i-1$  и  $i$  участков.

Стабильное контурное движение можно достичь если система расчёта траекторной ошибки, получая информацию о положении робота в пространстве, производит расчёты векторов  $\Delta L_0 = [\Delta l_0, \Delta h_0]^T$ ,  $\Delta L_1 = [\Delta l_1, \Delta h_1]^T$  и  $\Delta L_2 = [\Delta l_2, \Delta h_2]^T$  (нижний индекс обозначает принадлежность: 0 – центр симметрии корпуса; 1, 2 – номер точки крепления приводных блоков 1 и 2), в состав которых входят продольные и поперечные отклонения от траектории. Дополнительно необходимо вычислять задания углового положения  $\beta_0^{зад}$ ,  $\beta_1^{зад}$  и  $\beta_2^{зад}$ . Все указанные величины представлены на Рисунке 5 и будут передаваться в системный регулятор.

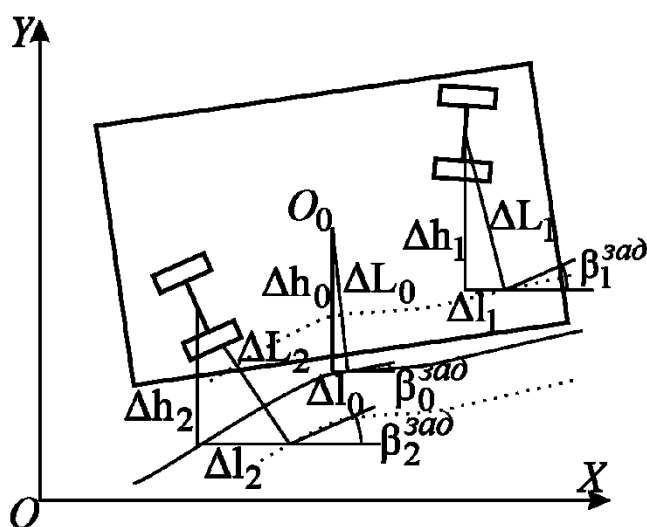


Рисунок 5 – Отклонения от траектории и заданные углы положения

Система управления является дискретной с фиксированным интервалом квантования, из-за чего расчёт заданного пройденного пути (тот путь, который должен быть пройден при заданной контурной скорости) центра корпуса робота можно осуществлять приращением произведения заданной контурной скорости на интервал вызова системы:

$$s_0 = s_0^* + v_c^{zad} \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где  $s_0$  – заданный пройденный путь на текущем временном интервале;  $s_0^*$  – заданный путь на предыдущем временном интервале;  $v_c^{zad}$  – заданная контурная скорость;  $\Delta t$  – интервал вызова системы управления (период квантования).

Для определения заданного углового положения точек корпуса воспользуемся информацией о заданном их положении на текущем и предыдущем временном интервале:

$$\beta_i^{zad} = \arctan \left( \frac{Y_i^{zad} - Y_i^*}{X_i^{zad} - X_i^*} \right), \quad (3)$$

где  $S_i^{zad} = [X_i^{zad}, Y_i^{zad}]^T$  – вектор заданного положения точки  $i$  на текущем временном интервале;  $S_i^* = [X_i^*, Y_i^*]^T$  – вектор заданного положения точки корпуса  $i$  на предыдущем временном интервале.

Вектор продольных и поперечных отклонений  $\Delta L_i$  вычисляется через заданное и текущее положение центра корпуса, а также информации о геометрическом расположении точки корпуса относительно центра:

$$\Delta L_i = R(\beta_i^{zad}) \cdot \left( \begin{bmatrix} X_0^{zad} - X_0^{mek} \\ Y_0^{zad} - Y_0^{mek} \end{bmatrix} + \left( R(-\beta_0^{zad}) - R(-\beta_0^{mek}) \right) \cdot \begin{bmatrix} l_i \\ h_i \end{bmatrix} \right), \quad (4)$$

$R(\beta_i^{zad})$  – матрица поворота на угол  $\beta_i^{zad}$  [17, с. 56];  $S_0^{zad} = [X_0^{zad}, Y_0^{zad}]^T$  – вектор заданного положения центра корпуса на текущем временном интервале;  $S_0^{mek} = [X_0^{mek}, Y_0^{mek}]^T$  – вектор текущего положения центра корпуса на текущем временном интервале (информация с датчика положения);  $L_i = [l_i, h_i]^T$  – вектор геометрического положения точки  $i$  относительно центра корпуса.

Итоговые выражения (3) и (4) позволяют вычислить заданные углы положения и вектор отклонений от траектории для любой точки корпуса, что позволяет их



применять для расчётов указанных величин для колёсных роботов с любым числом приводных блоков и различных конструкций. В научно-квалификационной работе приведена демонстрация работы разработанного блока для трёх типов конструкции расположения приводных блоков на двух траекториях.

### *Локальные регуляторы скорости электроприводов*

Следующим шагом была настройка локальной подсистемы регулирования электроприводами колёс. Для данной цели был выбран типовой пропорционально-интегрирующий (ПИ) регулятор из-за его широкой распространённости [1, 30] и готовой реализации на программном и аппаратном уровне в большинстве ПЛК.

Для ускорения процесса настройки локальной подсистемы электроприводов было решено произвести расчёт коэффициентов ПИ-регулятора методом желаемой передаточной функции из конструктивных (паспортных) параметров электродвигателя:

$$\begin{cases} k_o = \frac{I_{pij}}{k_{eij}}, \\ T_{\varepsilon} = \frac{L_{\text{я}ij}}{R_{\text{я}ij}}, \\ T_M = \frac{R_{\text{я}ij} \cdot J_{npij}}{k_{Mij} \cdot k_{eij}}. \end{cases} \quad (5)$$

$k_o$  – коэффициент усиления контура скорости электродвигателя;  $T_M$ ,  $T_{\varepsilon}$  – механическая и электромагнитная постоянные времени электродвигателя;  $I_{pij}$  – передаточное число редуктора электродвигателя колеса  $i j$ ;  $k_{eij}$ ,  $k_{Mij}$  – конструктивные параметры электродвигателя колеса  $i j$ ;  $L_{\text{я}ij}$ ,  $R_{\text{я}ij}$ ,  $J_{npij}$  – индуктивность, сопротивление обмотки и момент инерции на валу электродвигателя колеса  $i j$ .

За желаемую передаточную функцию взяли, используемую при настройке на модульный оптимум (МО), который также называется технический оптимум [37]:

$$W_{\text{жс}}(s) = \frac{1}{1 + 2 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (1 + T_{\mu} \cdot s)}, \quad (6)$$

$T_{\mu}$  – некомпенсированная постоянная времени.

Передаточная функция (6) обладает следующими свойствами переходного процесса: перерегулирование переходного процесса  $\sigma_n \approx 4,3\%$ , время первого достижения задания  $t_1 \approx 4,7 \cdot T_{\mu}$ , запас по фазе  $\varphi_n \approx 63^\circ$  [39]. Данных свойств системы регулирования скоростью достаточно для достижений поставленной задачи управления.

При настройке на МО производят компенсацию большей постоянной времени объекта регулирования, а малую оставляют некомпенсированной. Из-за особенности применяемых электродвигателей (малая постоянная времени находится в пределах 0,01 – 2,00 мс) и ограничений в аппаратной части системы управления (интервал квантования не меньше 1,00 – 5,00 мс в зависимости от применяемого ПЛК) было принято решения компенсировать малую постоянную времени, а большую оставить в качестве желаемой. Тогда, совершив все необходимые преобразования, получили итоговые выражения для расчёта коэффициентов ПИ-регуляторов локальной подсистемы регулирования скорости электроприводов колёс:

$$\begin{cases} K_{II} = \frac{k_{eij} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{T_{\theta}}{T_m}}\right)}{2 \cdot I_{pij} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{T_{\theta}}{T_m}}\right)}, \\ T_{II} = \frac{4 \cdot T_{\theta} \cdot I_{pij}}{k_{eij} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{T_{\theta}}{T_m}}\right)}, \end{cases} \quad (7)$$

$K_{II}$  – пропорциональная составляющая ПИ-регулятора;  $T_{II}$  – интегральная составляющая ПИ-регулятора.

В научно-квалификационной работе приведена демонстрация работы настроенных ПИ-регуляторов указанным способом при помощи математического моделирования на моделях двух электроприводов. Результаты показывают, что перерегулирование не превышает заявленных 4,3%, что дало нам предположить

возможность применения данного способа настройки в нашей работе.

### ***Системный регулятор согласования скоростей электроприводов***

После настройки локальной подсистемы происходило построение системного регулятора. Его основная задача – вычисление заданные скорости электроприводов колёс  $\omega_{\delta\epsilon 11}^{зад}$ ,  $\omega_{\delta\epsilon 12}^{зад}$ ,  $\omega_{\delta\epsilon 21}^{зад}$ ,  $\omega_{\delta\epsilon 22}^{зад}$  на основе информации об величине контурной скорости  $v_c^{зад}$ , отклонений от траектории  $\Delta L_0$ ,  $\Delta L_1$ ,  $\Delta L_2$ , заданных и текущих углов положения корпуса и приводных блоков  $\beta_0^{зад}$ ,  $\beta_1^{зад}$ ,  $\beta_2^{зад}$ ,  $\beta_0^{тек}$ ,  $\beta_1^{тек}$ ,  $\beta_2^{тек}$  и особенностях конструкции корпуса колёсного робота (Рисунок 6). Для оценки возможности применения различных подходом при расчёте управляющих воздействий было принято решение спроектировать системный регулятор в трёх различных формах: нелинейной, нечёткой и нейросетевой.

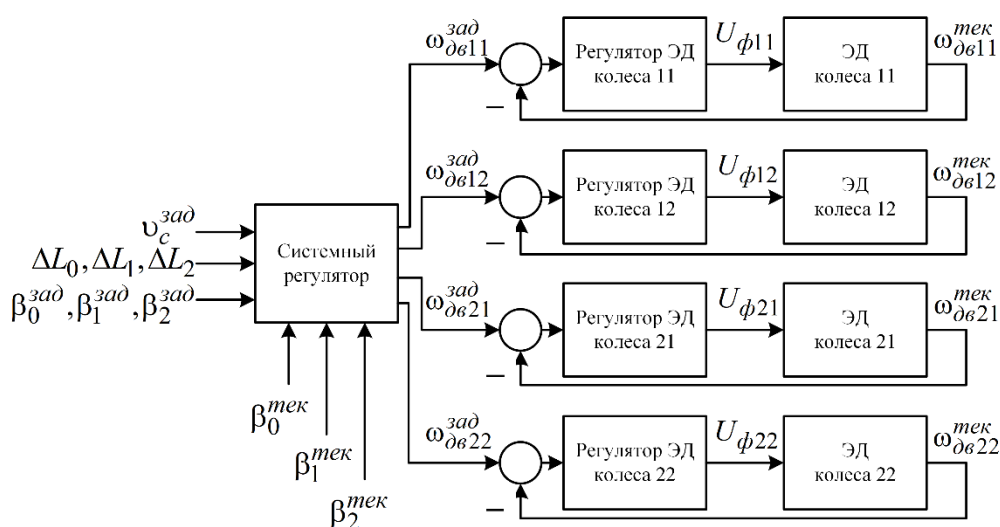


Рисунок 6 – Входные и выходные сигналы системного регулятора в системе согласованного управления

Нелинейный системный регулятор получил своё названия из-за применения в нём нелинейных элементов типа «зона насыщения» и «зона нечувствительности». При его проектировании применялся принцип декомпозиции, который позволил разделить регулятор на блок регулирования положения корпуса, блоки регулирования положением приводных блоков и блоки расчёта скоростей электродвигателей колёс.

Для управления центром корпуса робота достаточно производить управление

углом положения в пространстве  $\beta_0$ , меняя скорость вращения корпуса, и компенсировать продольную ошибку  $\Delta l_0$  с целью дополнительной регулировки контурной скорости  $v_c^{зад}$ . По этой причине блок регулирования положения корпуса содержит два регулятора: один для компенсации углового отклонения  $\Delta\beta_0$  корпуса, другой для уменьшения продольной ошибки  $\Delta l_0$ .

Основная задача при регулировании положения приводного блока  $i$  заключалась в уменьшении углового отклонения приводного блока  $\Delta\beta_i$  и поперечного отклонения от траектории  $\Delta h_i$ . Для каждой из указанных величин был спроектирован свой нелинейный регулятор.

Таким образом, регулятор положения корпуса осуществлял поддержание заданного углового и продольного траекторного положения корпуса робота, а регулятор положения приводных блоков компенсировал продольное отклонение от траектории. В работе раскрыты типы применяемых регуляторов и их основные характеристики.

Блок расчёта скоростей электродвигателей, получая информацию от регуляторов корпуса и приводных блоков, производит расчёт заданной скорости вращения электроприводов колёс и передаёт полученную информацию в локальную подсистему управления электроприводами. Все вычисления производятся из информации о типе перемещения колеса относительно корпуса в пространстве – оно совершает сложное движение [28, с. 155–158]. Тогда, заданные скорости электроприводов можно вычислить по формулам:

$$\begin{cases} v_i^{зад} = V_0^K \pm \omega_0^K \cdot |L_i|, \\ v_{ij}^{зад} = v_i^{зад} \mp \left( \omega_i^K \right) \cdot l_{ij}, \\ \omega_{двij}^{зад} = \pm \frac{v_{ij}^{зад}}{I_{pij} \cdot R_{Kij}}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $v_i^{зад}$  – заданная линейная скорость приводного блока  $i$  с учётом корректировки линейной и угловой скорости корпуса;  $\omega_0^K$ ,  $V_0^K$  – задания угловой и продольной

скорости корпуса робота с учётом корректировки;  $\omega_i^K$  – заданная скорость вращения приводного блока  $i$ ;  $|\vec{L}_i|$  – модуль вектора  $\vec{L}_i$  (расстояние от центра корпуса до точки крепления приводного блока  $i$ ). Знак перед  $(\omega_0^K \cdot |\vec{L}_i|)$  берётся согласно знаку  $h_i$  (продольная составляющая вектора  $\vec{L}_i$ ); знак перед  $(\omega_0^K + \omega_i^K)$  берётся обратный знаку  $l_{ij}$ ; знак перед выражением  $\omega_{\partial \theta ij}^{зад}$  берётся такой же, как у  $l_{ij}$  в векторе  $\vec{L}_{ij}$ .

Нечёткий системный регулятор использует нечёткую логику при выполнении расчётов управляющих воздействий. Аналогично нелинейному системному регулятору, применили принцип декомпозиции и получили нечёткий регулятор положения корпуса (регулирует угловое и продольное положение центра корпуса), нечёткий регулятор положения приводных блоков (регулирует угловое и поперечное положение приводных блоков), а также блок расчёта скоростей ЭД, указанный в (8). При выполнении нечётких операций применялся алгоритм Мамдани [38]. В работе раскрыта база правил и поверхности откликов указанных элементов.

Нейросетевой системный регулятор содержит нейросеть, выполняющую функцию стабилизации поперечного и углового положения корпуса и приводных блоков, нелинейный регулятор продольного положения центра корпуса и блок расчёта скоростей ЭД (8). Нейросеть, которая по своей структуре является двухслойной, неполносвязной, без инициализирующих входов нейронов и с функцией активации гиперболический тангенс ( $\tanh$ ), содержит нейрон корпуса и нейроны приводных блоков, соединённые с входами и между собой синапсами со своими весовыми коэффициентами. В работе указана структура нейронной сети стабилизации поперечного и углового положения и её математическое описание.

Общая структура системного регулятора, которая подходит для всех трёх указанных типов, представлена на Рисунке 7.

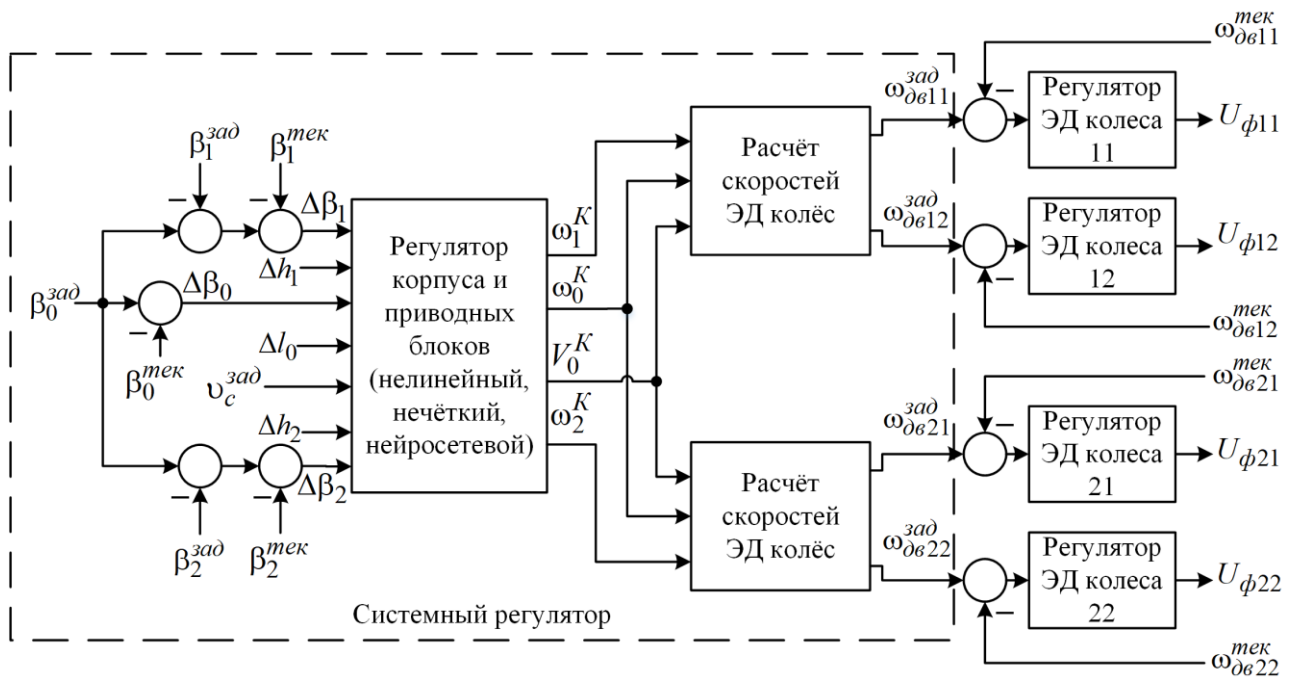


Рисунок 7 – Общая структура системного регулятора

Все получившиеся регуляторы способны управлять колёсными роботами с числом приводных блоков больше двух за счёт добавления дополнительных регуляторов/нейронов приводных блоков и блоков расчёта скоростей ЭД. В работе подробно описан данный механизм для каждого системного регулятора.

### ***Параметрическая оптимизация системного регулятора***

Исследуемый объект управления является технически сложным. По этой причине ручная настройка нелинейного и нечёткого системных регуляторов может стать очень трудоёмким процессом; при применении нейросетевого системного регулятора ручная настройка практически невозможна из-за необходимости проводить обучение нейронной сети, входящей в его состав. Данные факторы привели к необходимости введения процесса параметрической оптимизации [9, 10] для предварительной настройки указанных системных регуляторов и нахождения приближённого набора значений их коэффициентов / весов синапсов, выполняющих заданные критерии эффективности.

Перед постановкой задачи оптимизации было определено множество допустимых параметров – набор строго положительных чисел:

$$X = \left\{ k \in \mathbb{R} \quad \right\}, \quad (9)$$

где  $k_i$  –  $i$ -ый коэффициент / вес синапса системного регулятора.

Для определения критерия оптимальности (целевая функция) были рассмотрены основные требования к разработанной СУ. Для достижения максимальной добротности воспроизведения траектории необходимо выполнения минимума с.к.о. от траектории (траекторной ошибки):

$$\begin{cases} f_c(k) = \varepsilon_c^2(k), \\ I_c = f_c(k) \rightarrow \min, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\varepsilon_c^2(k)$  – квадрат с.к.о. контурной ошибки;  $f_c(k)$  – целевая функция критерия оптимальности по траекторной ошибке;  $I_c$  – критерий оптимальности по траекторной ошибке.

Помимо минимального отклонения от траектории следует поддерживать минимальное угловое отклонение от заданного угла положения корпуса в пространстве:

$$\begin{cases} f_\beta(k) = \varepsilon_\beta^2(k), \\ I_\beta = f_\beta(k) \rightarrow \min, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\varepsilon_\beta^2(k)$  – квадрат с.к.о. ошибки углового позиционирования;  $f_\beta(k)$  – целевая функция критерия оптимальности по угловой ошибке корпуса;  $I_\beta$  – критерий оптимальности по угловой ошибке корпуса.

Для улучшения качества процесса параметрической оптимизации было решено применить метод пакетного обучения [13], используемый при обучении нейронных сетей. Пакеты формировались из комбинаций нескольких траекторий с различными контурными скоростями.

Всё вышесказанное привело к задаче многокритериальной оптимизации:

$$I_D = I_D(\varepsilon_{c1}^2(k), \dots \dots \dots \text{in}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon_{ci}^2$  – квадрат с.к.о. контурной ошибки при испытании  $i$ ;  $\varepsilon_{\beta i}^2$  – квадрат с.к.о. углового позиционирования при испытании  $i$ ;  $n$  – количество элементов (испытаний) в пакете.

Для решения задачи (12) использовали линейную свёртку критериев [19], получив в результате взвешенную сумму критериев или аддитивную форму свёртки критериев [21]:

$$I_D = \sum_{i=1}^n \left( \alpha_{ci} \cdot \varepsilon_{ci}^2(k) + \alpha_{\beta i} \cdot \varepsilon_{\beta i}^2(k) \right) \rightarrow \min, \quad (13)$$

где  $\alpha_{ci}$ ,  $\alpha_{\beta i}$  – вещественный коэффициент (вес)  $i$ -го критерия контурной ошибки и углового позиционирования соответственно. Каждый коэффициент должен быть строго положительным вещественным числом таким, что сумма всех весов  $\alpha_{ci}$  с  $\alpha_{\beta i}$  равна 1. Веса  $\alpha_{ci}$  и  $\alpha_{\beta i}$  определяют степень важности частных критериев (11) и (12) и примем все  $\alpha_{ci} = \alpha_{\beta i} = \frac{1}{2 \cdot n}$ , т. к. результаты всех испытаний в пакете, и по траекторной ошибке, и по угловой ошибке имеют для нас равную степень важности. В работе приведено доказательство наличия экстремума функции (13) критерия оптимизации в точке  $I_D^*(0, \dots \dots \dots)$ .

Заключительным этапом постановки задачи параметрической оптимизации был выбор метода её решения. Наиболее подходящим оказался градиентный метод [12, 27] многомерной минимизации, называемый метод сопряжённых градиентов в форме Полака-Райбера [22, с. 67-68], из-за достаточно быстрой сходимости за счёт построения направлений минимизации ортогонально предыдущим. Метод сопряжённых градиентов имеет переменный шаг спуска, который определяется решением задачи одномерной минимизации Для её решения выбран метод Брента [32, с. 61-81], который базируется на комбинации метода парабол и золотого сечения, что позволяет достичь высокую точность и скорость сходимости.

В работе приведены результаты применения параметрической оптимизации методом компьютерного моделирования на двух траекториях с тремя конфигурациями корпуса колёсного робота (продольно-симметричное, поперечно-симметричное и несимметричное расположение приводных блоков), которые показывают, что применение предложенного критерия с комбинацией выбранных алгоритмов оптимизации системных регуляторов способно уменьшить



траекторную ошибку и исходное неустойчивое движение сделать устойчивым.

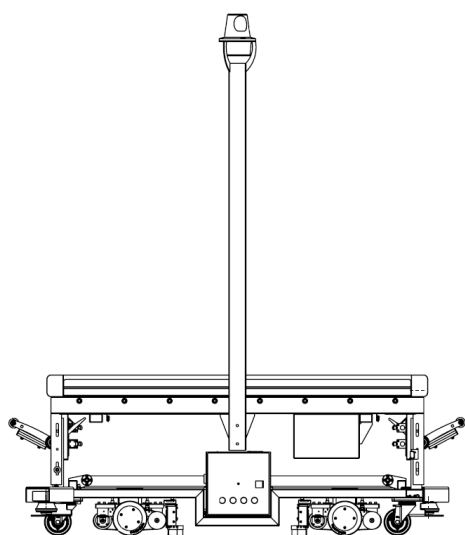
### **Теоретические и экспериментальные исследования процесса управления электроприводами колёсного робота**

Четвёртая глава посвящена заключительному этапу научно-квалификационной работы – теоретические и экспериментальные исследования на экспериментальной установке. Цель исследований заключалась в оценке адекватности построенной математической модели, возможности применения разработанной системы согласованного управления электроприводами, подтверждение предположению о применимости предложенного способа настройки локальной подсистемы электроприводов колёс и затрат вычислительных ресурсов при расчёте управляющих воздействий электроприводам.

#### ***План проведения эксперимента и используемое оборудование***

Эксперимент состоял из двух основных частей: теоретической, состоящую из реализации компьютерной модели и системы управления колёсного робота, вычисления коэффициентов локальных ПИ-регуляторов скорости электроприводов колёс и параметрической оптимизации коэффициентов системных регуляторов, и экспериментальной, состоящую из реализации разработанной системы управления с различными системными регуляторами на предложенном оборудовании, проведения эксперимента на установке с фиксацией контурной ошибки и скорости робота от значения пройденного пути, оценки добротности воспроизведения траектории СУ с различными системными регуляторами и определения затрачиваемых вычислительных ресурсов для расчёта управляющих воздействий при различной аппаратной базе.

Экспериментальная установка включала в себя четырёхколёсный мобильный робот типа нагружаемый AGV с двумя дифференциальными приводными блоками с продольно-симметричным расположением (Рисунок 8), электродвигатели Maxon RE 50, драйвер электроприводов KALEJA M5-2QB-12-48, ПЛК Siemens S7-1214C, навигационное устройство SICK 2D LiDAR NAV350 и датчики скорости вращения колёс и положения приводных блоков на базе AS5048.



а



б

Рисунок 8 – Экспериментальная установка: а – элементы чертежа (вид сбоку); б – фотография с места испытания

В работе приведена принципиальная электрическая схема указанной установки и акт о внедрения результатов научно-квалификационной работы в технологический процесс ООО «ФАМ» (г. Санкт-Петербург).

Испытания проводились на двух замкнутых траекториях (Рисунок 9), имитирующие реальные контуры перемещения колёсного робота при выполнении операций технологического процесса на предприятии. Измерения проводились в течение 300 секунд. На различных участках траектории свои заданные контурные скорости, значения которых представлены в работе.

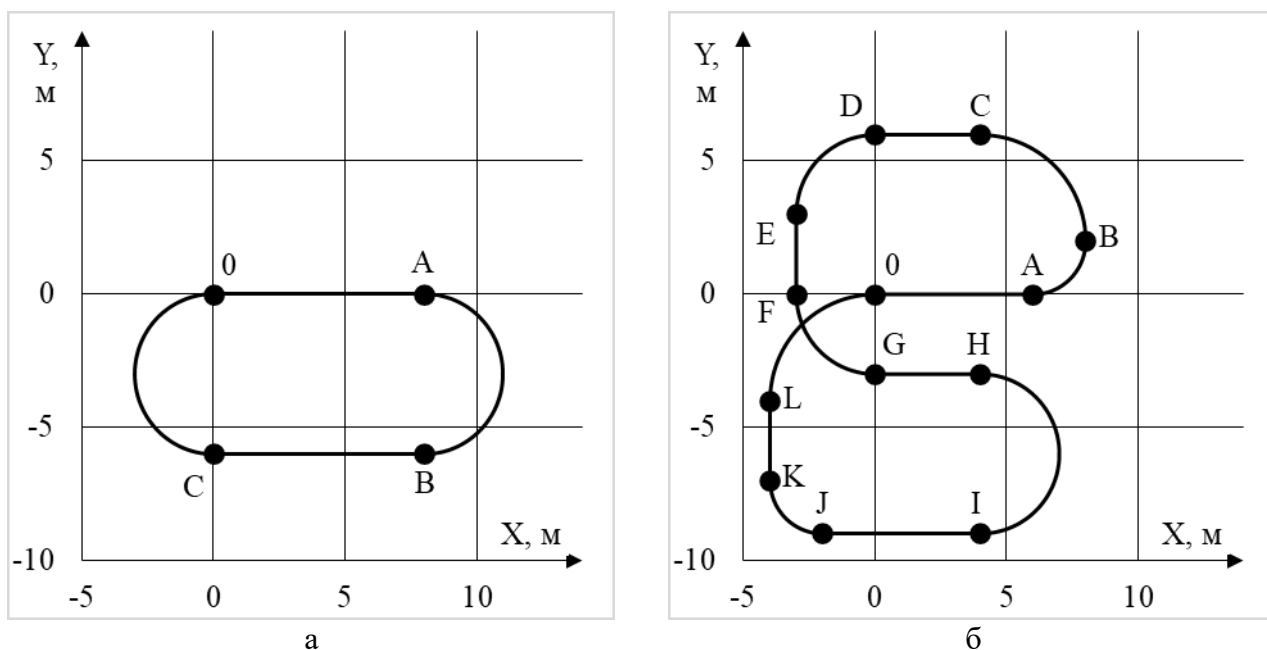
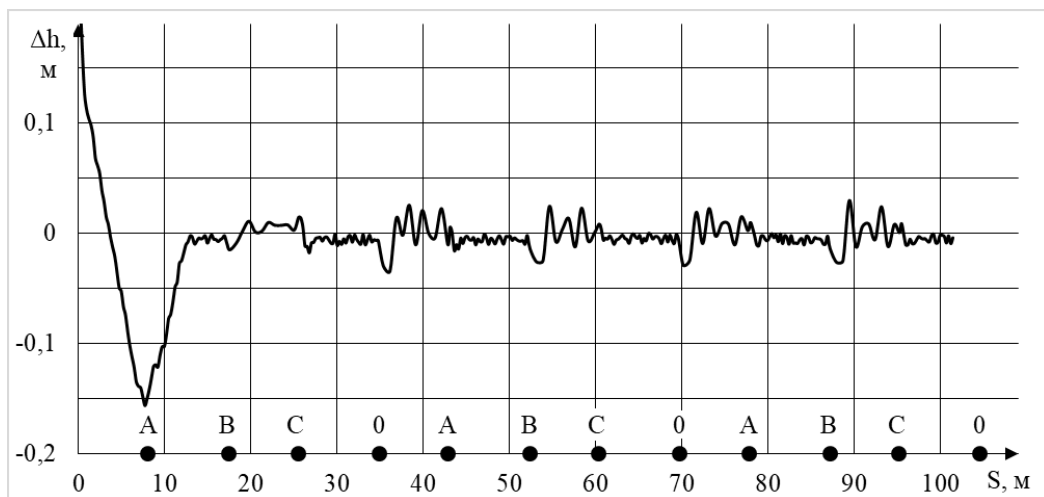


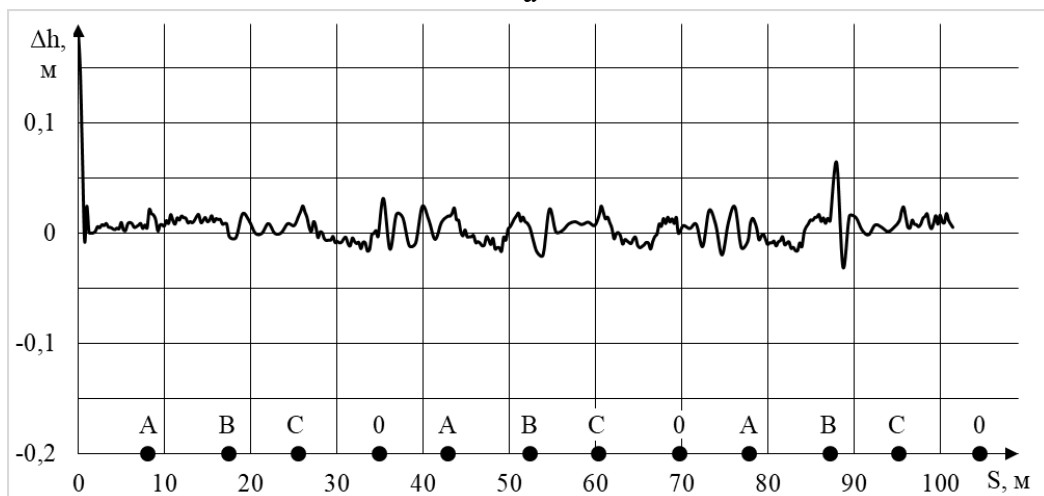
Рисунок 9 – Траектории, на которых проводились экспериментальные исследования работы системы согласованного управления электроприводами (буквами А, В, С, D, E, F, G, H, I, J, K и L обозначены точки сопряжения элементов траекторий):  
 а – Траектория №1; б – Траектория №2

### ***Результаты экспериментальных исследований процесса управления электроприводами колёсного робота***

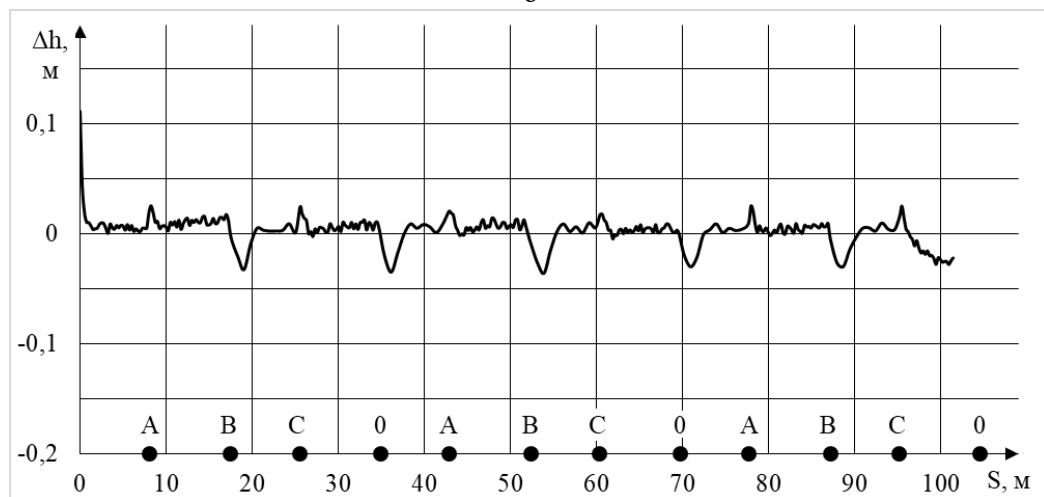
Перед представлением результатов эксперимента были указаны негативные особенности проведения эксперимента, среди которых невозможность точного позиционирования робота в точке 0, тряска устройства измерения положения, неровность поверхности перемещения и погрешности в корпусе робота. В работе для каждого шага эксперимента были показаны коэффициенты системных регуляторов после параметрической оптимизации и графики траекторной ошибки центра корпуса и контурной скорости от пройденного пути для каждого системного регулятора на обеих траекториях. На Рисунке 10 изображены графики только поперечного отклонения на траектории №1, на Рисунке 11 – на траектории №2.



а

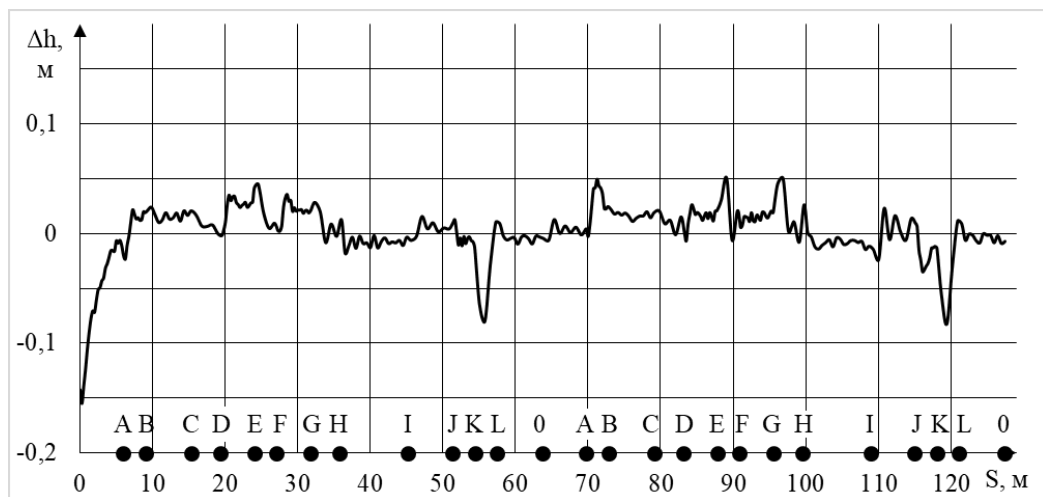


б

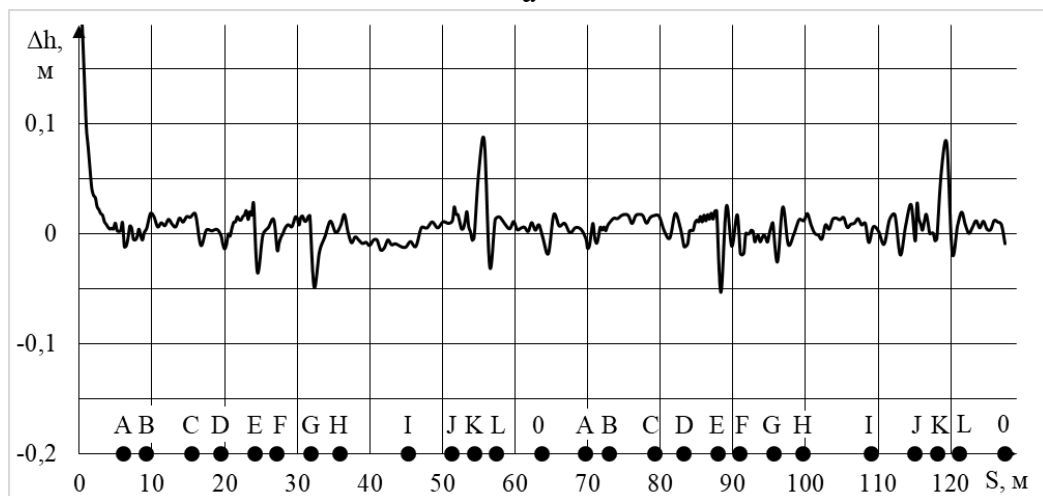


в

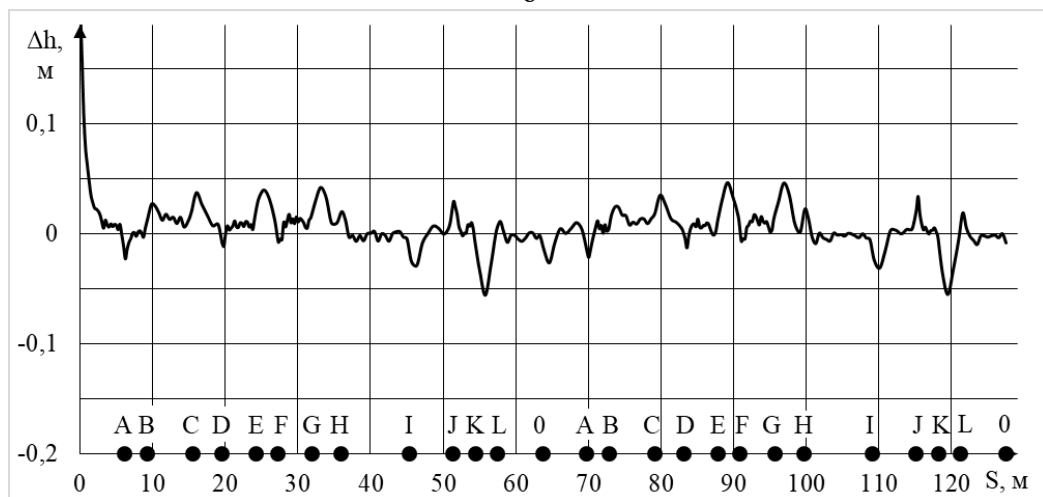
Рисунок 10 – График поперечного отклонения центра корпуса от пройденного пути при натуральных испытаниях на траектории №1: а – нелинейный системный регулятор; б – нечёткий системный регулятор; в – нейросетевой системный регулятор



а



б



в

Рисунок 11 – График поперечного отклонения центра корпуса от пройденного пути при натуральных испытаниях на траектории №2: а – нелинейный системный регулятор; б – нечёткий системный регулятор; в – нейросетевой системный регулятор

Результаты демонстрируют стабильное движение вдоль заданных контуров,

присутствуют небольшие «всплески» контурной ошибки и контурной скорости в точках сопряжения траекторий. Отклонение от траектории не превышает 0,08 м при применении нелинейного и нечёткого системного регулятора, 0,05 м при использовании нейросетевого. В целом, натурные эксперименты подтвердили возможность применения предложенных разработок и адекватность математической модели.

### ***Сравнение способов управления и их практического исполнения***

На основе экспериментальных данных было произведено сравнение систем согласованного управления с различными системными регуляторами вычислением средней добротности воспроизведения траектории  $D_{v,\varepsilon}$  для каждого контура. Результаты показали, что система управления с нечётким и нейросетевым системными регуляторами обладают значением  $D_{v,\varepsilon}$  примерно в 1,5 раза больше, чем у системы с нелинейным.

В заключении эксперимента была проведена оценка времени одного цикла расчёта управляющих воздействий электроприводам колёс при различном системном регуляторе и аппаратной части системы управления. На Рисунке 12 представлены результаты проведённых экспериментов, на которых видно, что применение нечёткого системного регулятора увеличивает время расчётов в 1,5 – 2,0 раза, чем при использовании нелинейного и нейросетевого системных регуляторов. Низкоскоростные ПЛК (S7-1214C, PM573) производят расчёты за время, не превышающее 4 мс, высокоскоростные ПЛК (S7-313C-2, S7-1510SP-1, M241SEC24T) – 2 мс, что является приемлемым для рассматриваемого типа объекта управления. Дополнительные устройства (микроконтроллеры и ПК с многоядерными процессорами) были рассмотрены с целью сравнения их с ПЛК.

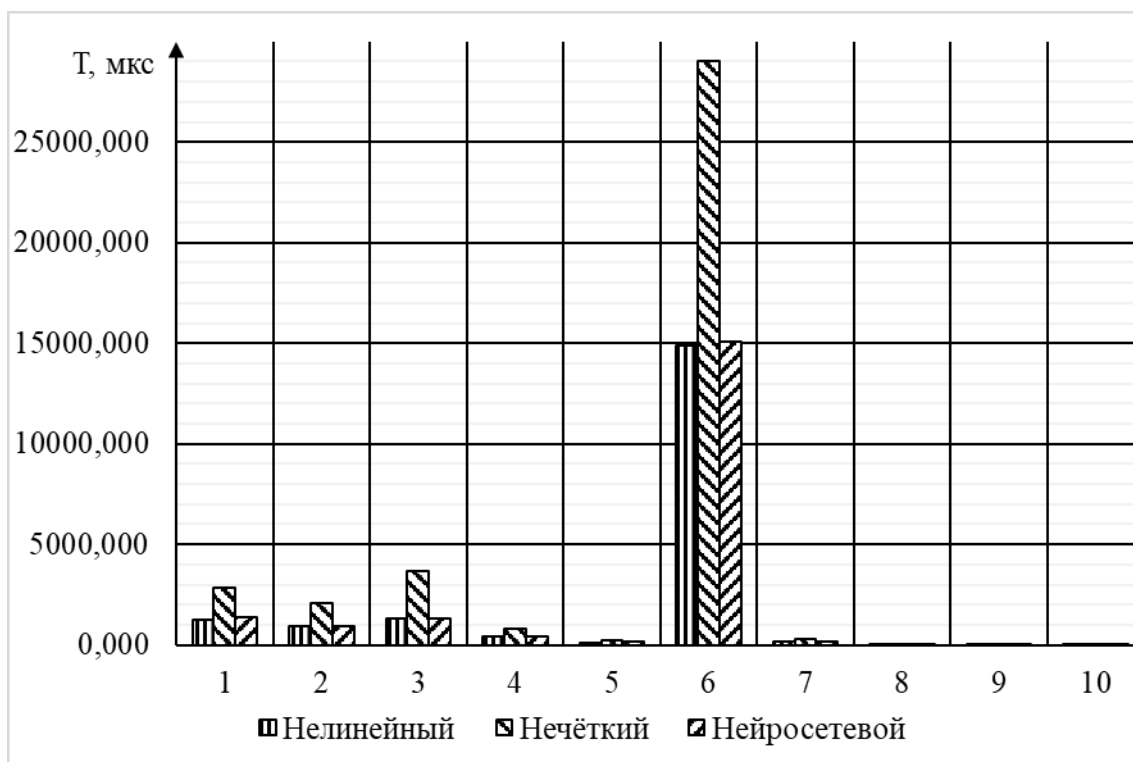


Рисунок 12 – Время выполнения одного цикла расчётов управляющих воздействий для системы электроприводов (в мкс) при различной конфигурации аппаратной части системы согласованного управления: 1 – ПЛК ABB PM573-ETH A6; 2 – ПЛК Siemens S7-313C-2 DP; 3 – ПЛК Siemens S7-1214C; 4 – ПЛК Siemens S7-1510SP-1; 5 – ПЛК Schneider Electric Modicon M241CEC24T; 6 – Микроконтроллер BECK SC24-IEC; 7 – Микроконтроллер STMicroelectronics STM32F103C8T6 (48,0 МГц); 8 – ПК с процессором AMD A8-5550M (2,1 ГГц) с операционной системой Linux Ubuntu Desktop 16.04; 9 – ПК с процессором Intel Core i5-7400 (3,0 ГГц) с операционной системой Windows 10; 10 – ПК с процессором Intel Core i5-7400 (3,0 ГГц) с операционной системой Linux Ubuntu Desktop 18.04

### ***Рекомендации по выбору структуры и реализации системы управления***

Используя результаты численных и натурных экспериментов, были рассмотрены положительные и отрицательные стороны применения каждого системного регулятора в разработанной системе согласованного управления. Данная информация позволит инженерам сделать выбор при реализации системы управления промышленным колёсным роботом с дифференциальными приводными блоками.

На основе результатов экспериментов и личного опыта были даны рекомендации по реализации системы согласованного управления и параметрической оптимизации системных регуляторов. Указанные рекомендации позволят ускорить процесс реализации, настройки системы управления, а также уменьшить время расчёта управляющих воздействий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках научно-квалификационной работы был решён ряд задач по решению проблемы согласования управления электроприводами четырёхколёсного мобильного робота с дифференциальными приводными блоками, среди которых:

1. построение масштабируемой математической модели, учитывающую динамику исследуемого объекта управления;

2. синтезирование системы согласованного управления электроприводами колёсных роботов с дифференциальными приводными блоками, учитывающая несимметричность конструкции и обладающая возможностью расширения для управление большим числом приводных блоков;

3. проектирование блока расчёта траекторной ошибки для роботов исследуемой конструкции;

4. вывод коэффициентов локальных ПИ-регуляторов скорости электроприводов колёс;

5. построение системного регулятора в трёх различных формах (нелинейной, нечёткой и нейросетевой);

6. вывод критерия и выбор метода параметрической оптимизации системного регулятора;

7. проведение теоретических и натуральных экспериментов, по итогам которых была подтверждена возможность применения результатов исследования, произведена оценка эффективности работы СУ с различными системными регуляторами по критерию добротности воспроизведения траектории и необходимого времени расчёта управляющих воздействий, и даны рекомендации по выбору и реализации СУ колёсных роботов с дифференциальными приводными блоками.

В завершении научно-квалификационной работы предложены варианты расширения данного исследования, среди которых дополнение математической модели и введение различных типов адаптивности системного регулятора.



## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (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. 76-82.
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. -.
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. -.
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. -.

### **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. – № . – С. -.

### **Материалы научных конференций:**

7. Мешковский, Е.О. Управления электроприводами четырёхколёсного

- мобильного робота / Е.О. Мешковский, В.Я. Фролов, А.Д. Курмашев // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020: сб. тез. VII Международной научно-практической конференции. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 360-366.
8. Мешковский, Е.О. Обоснование увеличения добротности воспроизведения траектории системы управления колёсного робота / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев, В.Я. Фролов // Российская наука в современном мире. Сб. ст. XXIX международной научно-практической конференции. 2020. – М: ООО «Актуальность.РФ», 2020. – С. 60-64.
9. Мешковский, Е.О. Применение метода Ньютона-Эйлера при построении математической модели четырёхколёсного мобильного робота с двумя дифференциальными приводными блоками / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев, В.Я. Фролов // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сб. ст. XI Международной научно-практической конференции. Отв. ред.: Гуляев Герман Юрьевич. Пенза, 2020. – Пенза: Наука и просвещение, 2020. – С. 50-54.
10. Мешковский, Е.О. Влияние коэффициентов нелинейного системного регулятора на добротность воспроизведения траектории системы управления колёсного робота с двумя дифференциальными приводными блоками / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев, В.Я. Фролов // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. Сб. науч. ст. по итогам четвертой международной научной конференции. 2020. – М: ООО «КОНВЕРТ», 2020. – С. 162-165.
11. Мешковский, Е.О. Настройка локальных регуляторов в системе согласованного управления четырёхколёсным мобильным роботом с двумя дифференциальными приводными блоками / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев, В.Я. Фролов // Наука и инновации в современном мире. Сб. науч. ст. Науч. ред.: А.Х. Щечоева – М: Издательство «Перо», 2020. – С. 135-140.
12. Мешковский, Е.О. Проектирование нечёткого регулятора стабилизации

- движения дифференциального приводного блока колёсного робота / Е.О. Мешковский // Высокие технологии и инновации в науке. Сб. избр. ст. Международной научной конференции. 2020. – СПб: ГНИИ «Нацразвитие», 2020. – С. 197-200.
13. Мешковский, Е.О. Проектирование нечёткого регулятора стабилизации движения корпуса колёсного робота с двумя дифференциальными приводными блоками / Е.О. Мешковский // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. Сб. науч. ст. по итогам пятой международной научной конференции. 2020. – М: ООО «КОНВЕРТ», 2020. – С. 150-154.
14. Мешковский, Е.О. Влияние коэффициентов нечёткого системного регулятора на добротность воспроизведения траектории системы управления колёсного робота с двумя дифференциальными приводными блоками / Е.О. Мешковский, А.Д. Курмашев, В.Я. Фролов // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2020. – №28. – С. 49-52.
15. Мешковский, Е.О. Экспериментальные сравнения реализаций системы управления четырёхколёсного мобильного робота / Е.О. Мешковский // Инновационная траектория развития современной науки: становление, развитие, прогнозы: сб. ст. III Международной научно-практической конференции (12 августа 2020 г.). – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2020. – С. 15-18.

#### **Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

16. Программа для моделирования режимов работы нелинейной системы согласованного управления электроприводами четырёхколёсного мобильного робота. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №20200613682 от 03 марта 2020 г. / Е.О. Мешковский.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, А.Г. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах / А.Г. Александров, М.В. Паленов // Автоматика и телемеханика. – 2014. – №. 2. – С. 16-30.
2. Антошкин, С.Б. Система управления автономного робота на основе метода обратных задач динамики / С.Б. Антошкин, М.В. Баканов, В.Н. Сизых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – №2 (62). – С. 15-23.
3. Берестова, С.А. Кинематическое управление движением колесных транспортных средств / С.А. Берестова, Н.Е. Мисюра, Е.А. Митюшов // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2015. – Т.25, №2. – С. 254-266.
4. Ван Цзянь, Траекторное управление движением твердого тела в пространстве / Ван Цзянь, А.Ю. Краснов, Ю.А. Капитанюк, С.А. Чепинский, С.А. Холунин, Чэнь Ифань, Лю Хуэйминь, Д.А. Хвостов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – №8. – С. 704-711.
5. Влахова, А.В. Математические модели движения колесных аппаратов / А.В. Влахова. – М.; Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2014. – 147 с.
6. ГОСТ 24.104–85. Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления. Общие требования. – Взамен ГОСТ 17195–76; Введ. с 01.01.1987. М.: Стандартиформ, 2009. – 10 с.
7. ГОСТ 29322-92 (МЭК 38-83). Межгосударственный стандарт. Стандартные напряжения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 6 с.
8. ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016 Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования. – М: Стандартиформ, 2016. – 226 с.
9. Грубый, С.В. Нелинейная оптимизация режимных параметров течения методом штрафной функции / С.В. Грубый // Известия вузов. Машиностроение. – 2018. – №4 (697). – С. 3-9.

10. Дунаев, М. П. Параметрическая оптимизация системы управления насосной станцией с помощью генетического алгоритма / М.П. Дунаев, Н.Н. Куцкий, Н.Д. Лукьянов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – №8. – С. 194-205.
11. Звонарев, И.С. Обучение нейросетевой системы управления многозвенным колесным мобильным роботом / И.С. Звонарев, Ю.Л. Караваев // Выставка инноваций - 2019 (весенняя сессия). Сборник материалов XXVII Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. 2019. – 2019. – С. 130-135.
12. Запрягаев, С.А. Вычисление и обучение искусственных нейронных сетей прямого распространения на графическом процессоре / С.А. Запрягаев, А.А. Карпушин // Вестник ВГУ: Системный анализ и информационные технологии. – 2011. – № 1. – С. 157-164.
13. Зуев, В.Н. Модифицированный алгоритм обучения нейронных сетей / В.Н. Зуев, В.К. Кемайкин // Программные продукты и системы. – 2019. – Т.32, №2. – С. 258-262.
14. Кауркин, И.А. Роботизация в горнодобывающей промышленности / И.А. Кауркин, В.В. Зиновьев // «РОССИЯ МОЛОДАЯ»: Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – С. 35006.
15. Краснов, А.Ю. Траекторное управление мобильными роботами при возмущающих воздействиях / А.Ю. Краснов, С.А. Чепинский, Чэнь Ифань, Лю Хуэйминь // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – №9. – С. 842-849.
16. Курмашев, А.Д. Повышение точности и скорости воспроизведения программных движений промышленными роботами: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Курмашев Арон Даутханович. – Ленинград, 1990. – 16 с.
17. Лурье, А. И. Аналитическая механика. – М.: Физматлит. – 1961. – 824 с.
18. Матюхин, В.И. Управление колесной системой при учете ее инерционных свойств / В.И. Матюхин // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2013. – №3. –

С. 10-21.

19. Меламед, И.И. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации / И.И. Меламед // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 9. – С. 119-125.

20. Михайлов, О.П. Гибкие производственные системы, промышленные роботы, робототехнические комплексы. Практическое пособие. Книга 14. Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов / О.П. Михайлов, Р.Т. Орлова, А.В. Пальцев – М.: Высшая школа. – 1989. – 111 с.

21. Ногин, В.Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации / В.Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – №4. – С. 73-82.

22. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика. – 2002. – 344 с.

23. Перегудова, О.А. Синтез дискретного управления движением механических систем / О.А. Перегудова, И.В. Кудашкина, Р.И. Хасанова // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (Конференция Пятницкого). Материалы XIV Международной научной конференции. 2018. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2018. – С. 324-327.

24. Пестерев, А.В. Каноническое представление нестационарной задачи путевой стабилизации / А.В. Пестерев, Л.Б. Рапопорт, С.Б. Ткачев // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2015. – №4. – С. 160-176.

25. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Т. I. Механика – М.: Наука, 1979. – 520 с.

26. Склипус, А.А. Управление автономным мобильным роботом / А.А. Склипус // Точная наука. – 2017. – №15. – С. 10-13.

27. Скороходов, А.В. Сравнительный анализ градиентных методов минимизации в задаче обучения многослойного персептрона / А.В. Скороходов, А.В. Тунгусова // Доклады ТУСУРа. – 2011. – №2 (24). – С. 98-102.

28. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 416 с.

29. Устинов, С.М. Вычислительная математика: учебное пособие для вузов по

направлениям подготовки "Системный анализ и управление" и "Информатика и вычислительная техника" / С.М. Устинов, В.А. Зимницкий – СПб: БХВ-Петербург – 2009. – 330 с.

30. Ang, K.H. PID control system analysis, design and technology / K.H. Ang, G. Chong, Y. Li // IEEE transaction on Control System Technology. – 2005. – Т. 4, №13. – С. 559-576.

31. Bakdi, A. Optimal path planning and execution for mobile robots using genetic algorithm and adaptive fuzzy-logic control / A. Bakdi, A. Hentout, H. Boutami, A. Maoudj, O. Hachour, B. Bouzouia // Robotics and Autonomous Systems. – 2017. – №89. – С. 95-109.

32. Brent, R.P. Algorithms for Minimization Without Derivatives. – Mineola, New York: Dover Publication, Inc. – 2013. – 208 с.

33. Falsafi, M.H. Fuzzy motion control for wheeled mobile robots in real-time / M.H. Falsafi, K. Alipour, B. Tarvirdizadeh // Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering. – 2019. – №8 (2). – С. 133-144.

34. González, D. An optimization design proposal of automated guided vehicles for mixed type transportation in hospital environments / D. González, L. Romero, M.d.M. Espinosa // PLoS ONE. – 2017. – №12 (5). – С. 0177944.

35. ISO 3691-4:2020(en) Industrial trucks - Safety requirements and verification - Part 4: Driverless industrial trucks and their systems. – ISO, 02.2020. – 84 с.

36. Jasmin, M. Design and implementation of WIFI controlled robotic rover based on raspberry-pi and Arduino / M. Jasmin, G. Angelo Virgin, G. Jeyalakshmi, B. Hemalatha // International Journal of Recent Technology and Engineering. – 2019. – №8 (1). – С. 22-25.

37. Kessler, C. Über die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise / C. Kessler // at - Automatisierungstechnik. – 1955. – №3 (1-12). – С. 40-49.

38. Mamdani, E.H. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller / E.H. Mamdani, S. Assilian // International Journal of Man-Machine Studies. – 1975. – №1 (7). – С. 1-13.

39. O'Dwyer, A. A Summary of PI and PID Controller Tuning Rules for Processes with

Time Delay. Part 1: PI Controller Tuning Rules / A. O'Dwyer // IFAC Proceedings Volumes. – 2000. – №33 (4). – С. 159-164.

40. O'Reilly, O.M. Intermediate Dynamics for Engineers: A Unified Treatment of Newton-Euler and Lagrangian Mechanics. 2nd Edition. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 408 с.

41. Pappalardo, C.M. Forward and inverse dynamics of a unicycle-like mobile robot / C.M. Pappalardo, D. Guida // Machines. – 2019. – №7 (1). – С. 5.

42. Robins M. Trajectory Tracking and Control of Differential Drive Robot for Predefined Regular Geometrical Path / M. Robins, S.H. Somashekhar // Procedia Technology. – 2016. – №25. – С. 1273-1280.

43. Saleem, O. Adaptive Fuzzy-PD tracking controller for optimal visual-servoing of wheeled mobile robots / O. Saleem, H. Hassan, A. Khan, U. Javaid // Control Engineering and Applied Informatics. – 2017. – №19 (3). – С. 58-68.

44. Schulze, L. Automated Guided Vehicle Systems Trends in Technology and Application / L. Schulze, M. Lucas, A. Baumann // Proceedings of the 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Manufacturing Engineering and Materials Handling, Parts A and B. – Orlando, Florida, USA: ASME, 2005. – С. 1421-1427.

45. Tiago G.A. Parametric Identification and Controller Design for a Differential-Drive Mobile Robot / G.A. Tiago, F.L. Walter, V.B.H. Renato // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – №51 (15). – С. 437-442.

Аспирант

\_\_\_\_\_

/ Мешковский Е.О. /