

На правах рукописи



Нгуен Туан Нгок

**БОРТОВАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА БЕСПИЛОТНОГО
АВТОМОБИЛЯ ДЛЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕСТОВЫХ ЗАЕЗДОВ**

Специальности:

05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы
(в технических системах)

05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации
(технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» на кафедре «Информационно-измерительная и биомедицинская техника».

Научные руководители:

Жулев Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор

Голь Станислав Артурович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Дунаев Александр Анатольевич,
доктор технических наук, профессор, «Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина», г. Рязань, профессор кафедры информатики и вычислительной техники

Тишкин Роман Валентинович,
кандидат технических наук, начальник отдела разработки и внедрения информационного и программного обеспечения ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» – филиал «ОКБ «Спектр», г. Рязань

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», г. Ковров

Защита состоится **20 июня 2014 г. в 12⁰⁰** на заседании диссертационного совета Д212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ.
Автореферат разослан «___» апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время автомобиль является одним из наиболее эффективных, доступных и востребованных наземных транспортных средств. Поэтому одной из ярко выраженных мировых тенденций последних десятилетий является автомобилизация, т.е. расширение использования автомобильного транспорта в различных сферах человеческой деятельности. Автоматизация производственного процесса, строгое тестирование новых моделей и версий автомобиля обеспечивает безопасность и удобство для людей. Необходимость увеличения выпуска и улучшения структуры автомобилей, более полно отвечающих потребностям народного хозяйства, требуют экономии топлива, повышения ресурса и снижения металлоемкости. В связи с этим повышение экономичности, высокие надежность, динамические и ездовые качества автомобиля, снижение его массы и уменьшение вредного воздействия на окружающую среду являются основными задачами автомобилестроения сегодняшнего дня. Для достижения предъявляемых требований в структуре комплекса автоматизированного тестирования необходимо разработать автономную систему управления автомобилем для проведения циклических тестовых заездов.

Вопросами проектирования мобильных робототехнических комплексов, их информационно-измерительных и управляющих систем занимались российские и зарубежные ученые В.П. Андреев, В.Л. Афонин, С.А. Воротников, Е.А. Девянин, М.Б. Игнатьев, П.Д. Крутько, Ю.В. Подураев, Л.Б. Рапопорт, А.М. Формальский, Н. Asada, Y. Kuwata, M. Liu, A. Nüchter, S. Thrun, A. Waj-Fraj, A. West и др.

Опытные образцы разрабатываемых автомобилей нового поколения, равно как и контрольные экземпляры серийного выпускаемых транспортных средств, непрерывно подвергаются жестким испытаниям на тестовом полигоне для выявления путей оптимизации их конструкции. С учетом часто меняющихся условий работа водителей требует большого числа управляющих воздействий и постоянной концентрации внимания, что способствует быстрой утомляемости. Даже у квалифицированных водителей с большим стажем после 4-5 часов непрерывного вождения из-за усталости снижается внимание и в 1,5-2 раза возрастает количество ошибок управления. Работа бригады испытателей – тяжелый, монотонный труд, связанный с опасным для здоровья уровнем вибраций и тряски.

Современные цифровые системы автоматического управления в состоянии реализовать практически сколь угодно сложные алгоритмы вне зависимости от принципа действия исполнительных устройств. Тем самым приоритеты при создании средств автоматики сместились в область информационных инноваций. С другой стороны, благодаря развитию вычислительной техники, при поиске решений задач данного класса стали широко применяться методы имитационного математического моделирования. Занимая минимальное время (что немаловажно с учетом сокращения сроков создания новой техники) и требуя меньших расходов, нежели традиционные методики натурных испытаний, моделирование при помощи ЭВМ открывает новые возможности для уг-

лубленного изучения характера влияния нового оборудования и алгоритмов управления на происходящие процессы и результирующие эксплуатационно-экономические показатели.

Цель диссертационной работы состоит в разработке бортовой информационно-измерительной и управляющей системы автопилота серийно выпускаемого автомобиля для автоматизации циклических тестовых заездов.

Задачи исследования.

1. Разработка структуры аппаратной части бортовой информационно-измерительной и управляющей системы.

2. Разработка регулятора, управляющего сцеплением, тормозом и акселератором и позволяющего исключить человека из процессов старта и полной остановки автомобиля.

3. Разработка алгоритмов траекторного управления транспортным средством, реализующих маневры, предусмотренные планом испытания автомобиля с учетом возможности огибания препятствий, не отраженных на карте испытательного полигона.

4. Аппаратная и программная реализация узлов и блоков бортовой информационно-измерительной и управляющей системы.

5. Экспериментальное исследование бортовой информационно-измерительной и управляющей системы автопилота с целью подтверждения правильности предложенных решений.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: теория и методы математического моделирования, законы теоретической механики, теория автоматического управления, цифровая обработка сигналов, теория нелинейных алгоритмов управления, базирующихся на нечеткой логике, теория калмановской фильтрации.

Научная новизна работы.

1. Синтезирован регулятор на основе нечеткой логики, управляющий сцеплением, тормозом и акселератором на основе данных от датчика частоты оборотов двигателя, акселерометров, связанных с шасси автомобиля и данных о нагрузке автомобиля, и обеспечивающий старт автомобиля без участия водителя-испытателя.

2. Предложена и реализована модификация алгоритма CL-RRT планирования локальной траектории автомобиля-робота, учитывающая в реальном времени неголономность автомобиля и оценку невязки реальной и заданной траекторий на основе ансамбленного фильтра Калмана.

3. Обоснована в ходе проектирования и полевых испытаний структура информационно-измерительной и управляющей системы автопилота серийно выпускаемого автомобиля.

Практическая значимость. В результате проведенных исследований сконструирован и изготовлен экспериментальный образец информационно-измерительной и управляющей системы, включающий в себя управляемый электромеханический привод сцепления, акселератора, тормоза и руля, а также программное обеспечение, позволяющее осуществлять старт, торможение и управление автомобилем при движении по траектории с заданной скоростью.

Апробация работы. Произведена в форме научных докладов, дискуссий по основным результатам диссертационной работы, которые проходили на следующих научных конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань 2013), Всероссийская научно-техническая конференция «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы» (Рязань 2013). Экспериментальный образец информационно-измерительной и управляющей системы использован на всероссийских полевых испытаниях автоматизированных транспортных средств «Робокросс-2013» в Нижнем Новгороде на полигоне «Берёзовая пойма» автозавода «ГАЗ», а также при проведении ресурсных испытаний автомобильных весов на научно-производственном предприятии ООО НПП «ТЕХНОСОФТ», г. Рязань.

Внедрение результатов работы. Результаты исследований в виде программной модели нечеткого регулятора и программного обеспечения планирования локальной траектории внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО РГРТУ и используются при проведении практических и лабораторных работ по дисциплинам «Проектирование цифровых измерительных систем» и «Телеизмерения» со студентами направления 200100 «Приборостроение».

Результаты исследований в виде разработанной бортовой информационно-измерительной и управляющей системы автопилота автомобиля «ГАЗель-Бизнес» внедрены на научно-производственном предприятии ООО НПП «ТЕХНОСОФТ», г. Рязань для проведения ресурсных испытаний автомобильных весов АВС-02.101.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 5 статей – в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, и 2 тезиса докладов на международных и Всероссийских научно-технических конференциях.

Положения, выносимые на защиту

1. Регулятор на основе нечеткой логики, управляющий сцеплением, тормозом и акселератором автомобиля, обеспечивающий требуемые условиями испытаний длительность сценария начала движения транспортного средства на ровной и наклонной поверхности и позволяющий на 18 % сократить время тестирования механизма сцепления по сравнению со штатным режимом, т.е. при управлении автомобилем водителем-испытателем.

2. Модификация алгоритма планирования локальной траектории CL-RRT, учитывающая неголономность автомобиля и невязку заданной и реализуемой траекторий, оцениваемую ансамблем фильтров Калмана, позволяет планировать и корректировать траекторию движения в реальном времени.

3. Обоснованная в работе структура информационно-измерительной и управляющей системы автопилота обеспечивает замену ручного управления водителем-испытателем на автоматическое при выполнении тестовых заездов и тестировании механизма сцепления автомобиля.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 97 наименований и 4 приложений. Диссертационная работа содержит 190 страниц, в том числе 154 страницы основного текста, 119 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, проанализировано состояние проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы автономного управления транспортными средствами и автоматизации тестовых заездов в ходе испытаний изделий автомобильной промышленности.

Проведен анализ характеристик существующих автомобилей-роботов и автономных транспортных средств. Описаны основные перспективы развития автономных транспортных средств. Показано, что, несмотря на стремление в первую очередь создать автономный автомобиль для движения в городских и загородных условиях, автомобильные концерны рассматривают и вопросы автоматизации испытаний готовой продукции. При этом информации о технических и программных решениях, используемых в данной области на порядок меньше, чем информации об автономно передвигающихся автомобилях.

Отмечено, что дополнительной особенностью, отличающей задачу автоматизации испытаний продукции дивизиона коммерческих автомобилей автозавода «ГАЗ», является использование в них исключительно механической коробки переключения передач, как наиболее экономичной и ремонтпригодной в отечественных условиях.

Проанализированы достоинства и недостатки различных типов электроприводов, используемых в качестве актуаторов в мехатронных системах. Показано предпочтительное применение двигателей постоянного тока перед другими типами электрических двигателей в системе автоматического управления автомобилем с механической коробкой переключения передач. Произведен выбор электроприводов постоянного тока для реализации управляемого электро-механического привода сцепления, акселератора, тормоза и руля автомобиля.

В данной главе анализируются также особенности применения вероятностного подхода к оценке положения автономного транспортного средства в пространстве. Показано, что для повышения надежности получаемых оценок положения необходимо использование развитой информационно-измерительной системы с многочисленными, зачастую дублирующимися, измерительными каналами.

В заключительной части главы отмечается, что применение автономной информационно-измерительной и управляющей системы позволит не только исключить человека из некоторых процессов испытания готовой продукции на автополигоне, но и проводить новые виды испытаний, изначально невозможные из-за повышенной опасности для водителя-испытателя.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию электропривода базовых подсистем управления автомобилем, а именно, электро-механического устройства автоматизации акселерации, торможения, переключения передач,

руления, а также сцепления вала двигателя внутреннего сгорания с трансмиссией.

Отмечается, что сценарий начала движения по сложности и чёткости действий является одним из самых сложных процессов. Система привода сцепления представляет собой объект управления высокой сложности со сложной математической моделью и широким диапазоном изменения параметров. Известные подходы к реализации сценария старта автомобиля, основанные на дифференциальных уравнениях, моделирующих трансмиссию, либо неприемлемы с точки зрения требуемой производительности бортового компьютера при переходе к их интегрированию вычислительными методами, либо не учитывают специфику задачи тестовых испытаний, предполагающую минимизировать время старта движения при условии обеспечения достаточно плавного включения сцепления. Т.е. известные методы не позволяют повысить эффективность тестирования сцепления на отказ путем сокращения времени выполнения стандартного количества циклов старта и остановки транспортного средства.

Ввиду перечисленных требований и особенностей во второй главе предложена реализация системы с использованием управления на базе нечёткой логики. Такой подход позволяет не только исключить идентификацию большинства параметров трансмиссии автомобиля, но и в перспективе позволит обеспечить воспроизведение опыта профессионального водителя. В качестве измерительных данных разработанная система использует информацию об угловой скорости вращения ведущего вала ДВС (штатный датчик оборотов), угле наклона поверхности старта (интегральный акселерометр), массе автомобиля (датчик силы на задней подвеске автомобиля), а также данные о положении рычагов актуаторов электромеханических приводов педалей сцепления и тормоза (оптические инкрементальные энкодеры). Особенностью разработанной системы управления для реализации старта автомобиля является выделение двух нечётких регуляторов и подсистемы управления педалью тормоза (рис. 1).

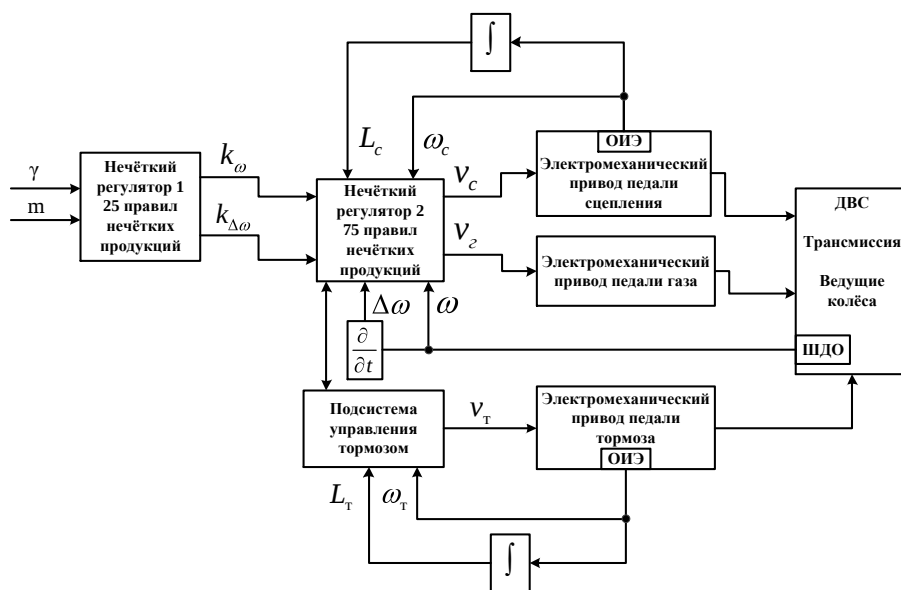


Рисунок 1 – Функциональная схема нечеткого регулятора.

Нечёткий регулятор первого уровня обеспечивает формирование значений коэффициента угловой скорости вращения вала ДВС k_ω и коэффициента приращения угловой скорости вращения вала ДВС $k_{\Delta\omega}$ на основе измеренных значений угла наклона поверхности старта γ и массы автомобиля m . Нечёткий регулятор второго уровня обеспечивает вычисление необходимых скоростей вращения валов электромеханических приводов педалей газа v_g и сцепления v_c на основе значений, полученных от нечёткого регулятора первого уровня и измеряемых данных угловой скорости вращения вала электромеханического привода педали сцепления ω_c , линейного перемещения рычагов актуатора L_c , а также угловой скорости вращения ω и изменения угловой скорости вращения $\Delta\omega$ ведущего вала ДВС. Функционирование подсистемы управления педалью тормоза осуществляется с использованием данных угловой скорости вращения вала электромеханического привода ω_t , а также линейного перемещения рычага актуатора L_t . Подсистема управления тормозом (не базируется на нечеткой логике) определяет скорость перемещения рычага актуатора электромеханического привода педали согласно блок-схеме, приведённой на рис. 2, где ω_{cp} – граничное значение угловой скорости вращения вала ДВС, при котором крутящий момент, передаваемый валом ДВС ведущему валу сцепления достаточен для удержания автомобиля при текущем угле наклона поверхности старта, v_T – линейная скорость перемещения рычага актуатора электромеханического привода педали тормоза, v_{max} – максимальная линейная скорость перемещения рычага актуатора электромеханического привода, L_g и L_n – верхняя и нижняя граница линейного перемещения рычагов актуатора.

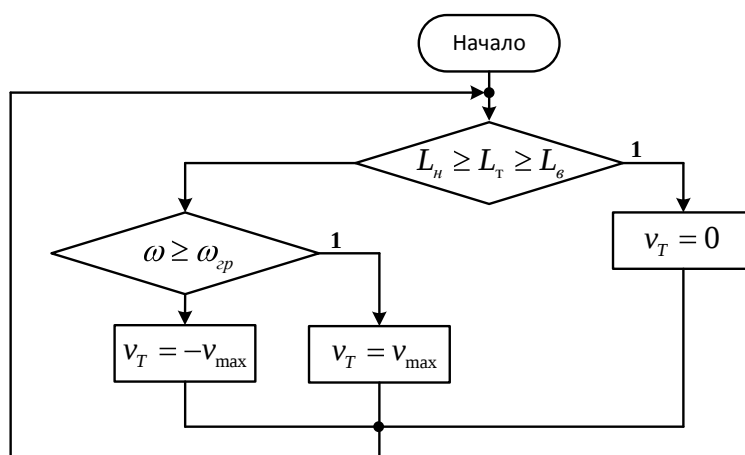


Рисунок 2 – Фрагмент алгоритма работы подсистемы управления тормозом

Введение двух нечётких регуляторов позволило снизить сложность системы за счёт разделения функций управления, результатом чего стало уменьшение времени вычисления и возможность работы системы в режиме реального времени. Ввиду особенностей построения систем на базе нечёткой логики, увеличение числа входных и выходных переменных приводит к резко-

му возрастанию количества правил формирования нечётких продукций, что также сказывается и на повышении сложности самих правил и может привести к снижению устойчивости системы.

Описание лингвистических переменных обоих нечетких контроллеров базируется на Λ -функциях принадлежности (рис. 3). При реализации системы использовался алгоритм нечёткого вывода Мамдани. Для первой нечёткой системы сформировано 25 правил нечётких продукций вида:

ЕСЛИ « γ есть Γ и m есть M », ТО « k_ω есть K_1 и $k_{\Delta\omega}$ есть K_2 », где γ, m – нечёткие входные переменные, $k_\omega, k_{\Delta\omega}$ – выходные переменные, Γ, M, K_1, K_2 – некоторые заданные функции принадлежности.

Для второй нечёткой системы сформировано 75 правил нечётких продукций вида:

ЕСЛИ « ω есть $A1$ и $\Delta\omega$ есть $B1$ и L_c есть $C1$ », ТО « v_c есть $E1$ и v_z есть $F1$ », где $\omega, \Delta\omega, L_c$ – нечёткие входные переменные, v_c, v_z – выходная переменная; $A1, B1, C1, E1, F1$ – некоторые заданные функции принадлежности.

Процесс дефаззификации реализован с использованием метода нахождения центра масс.

Нечёткий регулятор первого уровня на основе измеренных данных m и γ вычисляет значения коэффициентов k_ω и $k_{\Delta\omega}$, которые смещают и масштабируют области определения функций принадлежности второго нечеткого регулятора. Частный пример такой модификации функций принадлежности при $k_\omega = 1,3$ приведен на рис. 3.

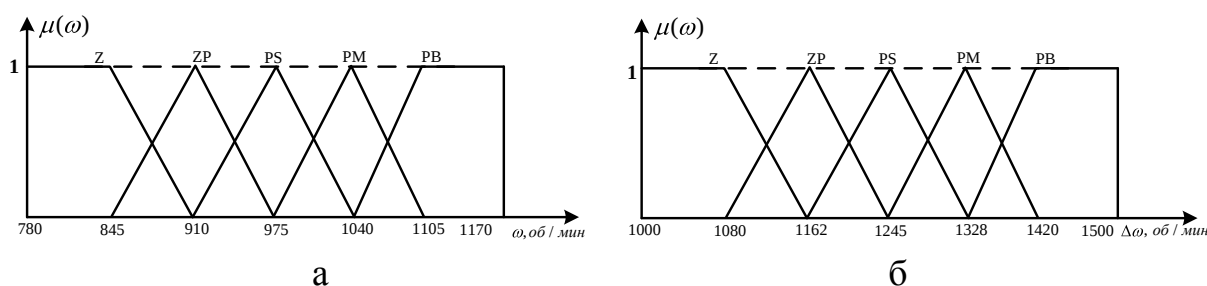


Рисунок 3 – Пример смещения и масштабирования области определения функции: а) исходные, б) преобразованные функции принадлежности

Исследования разработанного алгоритма проводились на автомобиле-роботе «ГАЗель БИЗНЕС» РГРТУ. На рис. 4 приведены зависимости угловой скорости вращения вала ДВС от времени при старте автомобиля в поворот (самые жесткие условия) на наклонной (10°) поверхности под управлением водителя-испытателя (а) и автопилота (б). Качественно можно отметить обеспечение комфортного старта автомобиля в обоих случаях, что свидетельствует о достаточной степени воспроизведения опыта водителя автопилотом. При этом автопилот выполняет старт быстрее, что вызывает больший размах сигнала, допустимый при такого рода тестах.

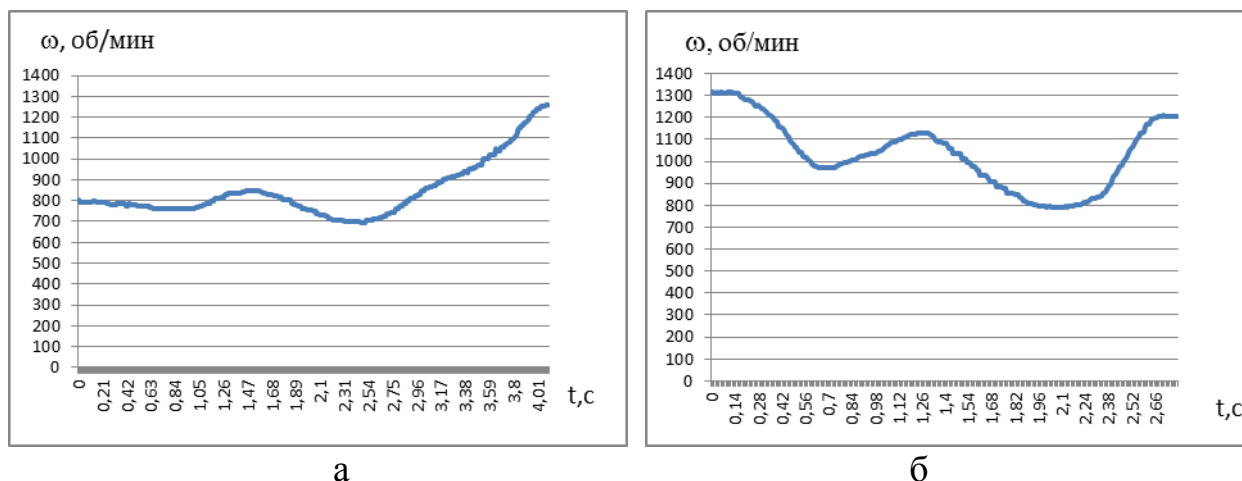


Рисунок 4 – Зависимости угловой скорости вращения вала ДВС от времени при управлении автомобилем: а) водителем-испытателем, б) автопилотом

Третья глава посвящена автономному траекторному управлению автомобилем-роботом.

Описаны выбор математической модели движения транспортного средства, архитектура программы управления транспортным средством, реализация ансамблевого фильтра Калмана для задачи оценки положения автомобиля-робота в пространстве, алгоритм планирования локальной траектории.

В качестве кинематической модели движения транспортного средства была выбрана модель велосипеда, основанная только на геометрических закономерностях системы. В данной модели передняя и задняя пары колёс заменяются одним колесом соответственно. Уравнение движения автомобиля имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta), \\ \dot{y} = v \sin(\theta), \\ \dot{\theta} = \frac{v}{L_{oc}} \tan(\delta_f) \end{cases}$$

где x, y – координаты геометрического центра автомобиля-робота, θ – ориентация автомобиля-робота, v – скорость движения, L_{oc} – длина колесной базы, δ_f – угол поворота рулевого колеса.

Модель движения велосипеда подходит для описания кинематики движения транспортного средства на скорости не более 20 км/ч. Программа управления автомобилем-роботом представляет собой набор программных модулей, осуществляющих получение измерительных данных, их обработку и формирование управляющих решений.

В состав бортовой информационно-измерительной системы автомобиля-робота входят разнородные, основанные на различных физических принципах, датчики для определения положения и ориентации: GNSS-приёмник GNS1316 (темп выдачи координат 1Гц); плата инерциальной навигации для определения ориентации UM6-LT, содержащая трехосевые гироскоп, акселерометр и

магнитный компас (10Гц); абсолютный энкодер угла поворота руля и инкрементальный энкодер на карданном валу автомобиля (70Гц).

Эти датчики являются дублирующими измерительными каналами с недостаточной точностью (в контексте решаемой задачи оценивания положения автомобиля в пространстве), накоплением ошибок при интегрировании и различным темпом выдачи данных. Для комбинирования измерительной информации от подобных каналов применяют различные разновидности фильтра Калмана, что позволяет снизить неопределенность итоговой оценки вектора состояния. Для решения поставленных задач в третьей главе обоснован выбор и реализован ансцентный фильтр Калмана.

Вектор оцениваемых параметров системы (вектор состояния)

$$\mathbf{x} = x_p, y_p, \theta, \tilde{\theta}, v^T,$$

где x_p, y_p – положение автомобиля, θ – ориентация, $\tilde{\theta}$ – угловая скорость, v – линейная скорость автомобиля.

Функция перехода состояния системы описывается выражением

$$f \mathbf{x} = \begin{cases} x'_p = x_p + v \cos \theta, \\ y'_p = y_p + v \sin \theta, \\ \theta' = \theta + \tilde{\theta}, \\ \tilde{\theta}' = \tilde{\theta}, \\ v' = v. \end{cases}$$

Модель наблюдений представляет собой функцию предсказания показаний датчиков на основе текущего вектора состояния. Вектор измеряемых параметров

$$\mathbf{z} = (x_{GPS}, y_{GPS}, \theta_{GPS}, \theta_{AHRS}, \tilde{\theta}_{GYRO}, \tilde{\theta}_{ENC}, v_{GPS}, v_{ENC})^T,$$

где $x_{GPS}, y_{GPS}, \theta_{GPS}, v_{GPS}$ – координаты, курс и скорость GNSS соответственно, θ_{AHRS} – оценка ориентации платы инерциальной навигации, $\tilde{\theta}_{GYRO}$ – угловая скорость по гироскопу, $\tilde{\theta}_{ENC}$ – угловая скорость на основе данных карданного и рулевого энкодеров, v_{ENC} – скорость автомобиля на основе карданного энкодера.

Перевод вектора состояния в домен измерений осуществляется согласно следующему выражению

$$h \mathbf{x} = \begin{cases} x_{GPS} = x_p, \\ y_{GPS} = y_p, \\ \theta_{GPS} = \theta, \\ \theta_{AHRS} = \theta, \\ \tilde{\theta}_{GYRO} = \tilde{\theta}, \\ \tilde{\theta}_{ENC} = \tilde{\theta}, \\ v_{GPS} = v, \\ v_{ENC} = v. \end{cases}$$

В диссертационной работе использован следующий вариант ансцентного фильтра Калмана.

Стадия инициализации

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = E \mathbf{x}_0 ,$$

$$P_0 = E \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0 & \mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0^T \end{bmatrix}.$$

Далее для $k \in 1, 2, \dots$ выполняются стадии предсказания и коррекции.

Стадия предсказания

Ансцентное преобразование для оценки математического ожидания вектора состояния.

1. Вычисление списка χ_k^a из $2L+1$ сигма-точек ($L=n$, где n – длина вектора $\mathbf{x}$):

$$\chi_{k,0} = \mathbf{x}_k ,$$

$$\chi_{k,i} = \mathbf{x}_k + \gamma \sqrt{P_k}^i, i=1, \dots, L,$$

$$\chi_{k,i} = \mathbf{x}_k - \gamma \sqrt{P_k}^i, i=L+1, \dots, 2L.$$

2. Трансформация сигма-точек через функцию перехода системы:

$$\chi'_{k,i} = f \chi_{k,i}, i=0, \dots, 2L.$$

3. Оценка математического ожидания:

$$\bar{\mathbf{x}} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \chi'_{k,i}.$$

4. Оценка матрицы ковариации:

$$P'_k = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \left[\chi'_{k,i} - \bar{\mathbf{x}}_k \right] \left[\chi'_{k,i} - \bar{\mathbf{x}}_k \right]^T + Q_k, \text{ где } Q_k - \text{матрица ковариации процесса.}$$

Оценка математического ожидания вектора измерений.

1. На основе списка трансформированных сигма-точек формируется список предсказанных измерений:

$$\mathbf{z}'_{k,i} = h \chi'_{k,i}, i=0, \dots, 2L.$$

2. Оценка математического ожидания вектора измерений:

$$\bar{\mathbf{z}}_k = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \mathbf{z}'_{k,i}.$$

3. Оценка ковариации измерений:

$$P'_{z,k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \left[\mathbf{z}'_{k,i} - \bar{\mathbf{z}}_k \right] \left[\mathbf{z}'_{k,i} - \bar{\mathbf{z}}_k \right]^T + R_k, \text{ где } R_k - \text{матрица ковариации измерений.}$$

Оценка взаимной ковариации состояния и измерений:

$$P'_{xz,k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c \left[\chi'_{k,i} - \bar{\mathbf{x}}_k \right] \left[\mathbf{z}'_{k,i} - \bar{\mathbf{z}}_k \right]^T.$$

Стадия коррекции

$$K_k = P'_{xz,k} P'^{-1}_{z,k},$$

$\hat{\mathbf{x}}_k = \bar{\mathbf{x}}_k + K_k \mathbf{z}_k - \bar{\mathbf{z}}_k$, где $\mathbf{z}_k$ – актуальное измерение, $\hat{\mathbf{x}}_k$ – оценка вектора состояния системы на шаге k .

$$P_k^a = P_k'^a - K_k P'_{z,k} K_k^T.$$

На рис. 5 представлен результат оценки траектории, полученной с использованием ансамблевого фильтра Калмана (сплошной линией показана траектория на основе измерительных данных GNSS, пунктирной линией – результат фильтрации). Из рисунка видно, что вблизи зданий оцененная фильтром траектория находится в пределах дороги, в отличие от траектории, построенной по данным GNSS.

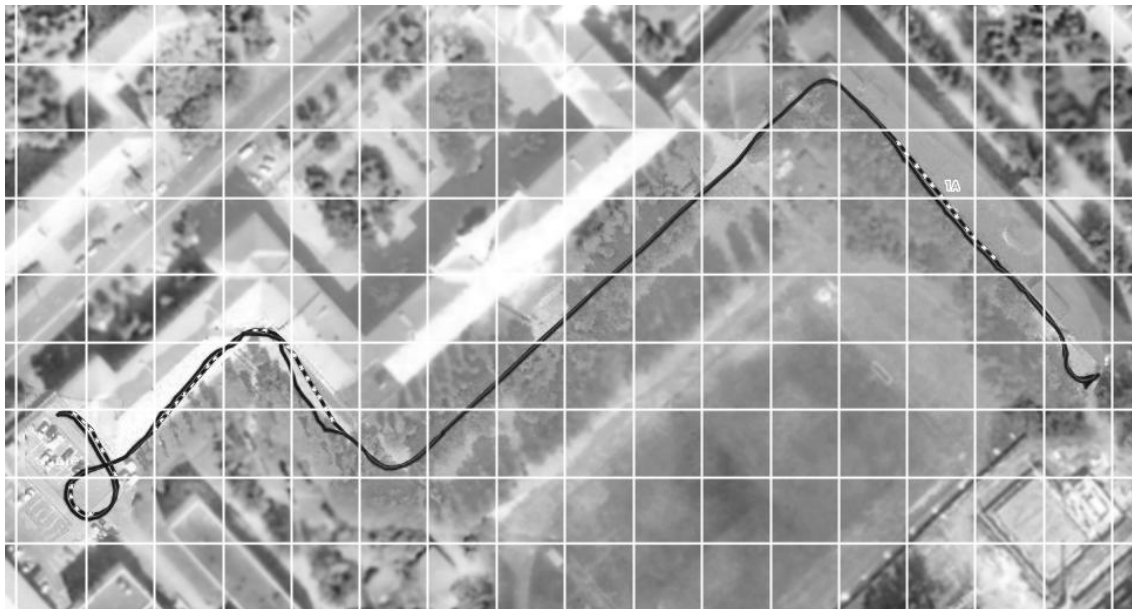


Рисунок 5 – Результат оценки положения на основе ансамблевого фильтра Калмана (сторона ячейки координатной сетки 20 м)

Планирование локальной траектории – получение траектории, которая учитывает расположение дороги и препятствий, а также кинематические и динамические ограничения автомобиля и положение ключевых точек маршрута осуществляется в ограниченном радиусе вокруг автомобиля, что определяется максимальной дальностью, определяемой лазерным дальномером с плоской диаграммой направленности.

Процесс поиска кратчайшего пути в непрерывном пространстве состояний, в общем случае, представляет собой неразрешимую задачу, так как перебор всех состояний невозможен. Альтернативные методы, основанные на случайном поиске, позволяют получить траекторию, близкую к оптимальной. Известным представителем данной группы методов является RRT – Rapidly exploring Random Tree – быстро разворачивающееся случайное дерево.

Однако применение RRT напрямую также невозможно, ввиду того, что этот метод также не учитывает кинематические ограничения автомобиля-робота. Алгоритм, предложенный Kuwata и др. CL-RRT (CL – Closed-loop – замкнутый контур), позволяющий учитывать указанные выше ограничения, взят за основу в настоящей работе. Общая схема предложенного алгоритма планирования локальной траектории показана на рис. 6.

Траектория представляется в виде набора дуг и отрезков, составляющих так называемые пути Дьюбинса. Данный способ позволяет описать траекторию

движения автомобиля из положения $A \ x, y, \theta$ в положение $B \ x', y', \theta'$ с учётом ограничения минимального радиуса поворота автомобиля R_{turn_min} .

Дерево решения представляет собой связанный набор вершин. Каждая вершина характеризуется координатами x, y, θ , а также кривой Дюбинса, по которой необходимо проследовать, чтобы попасть в них из предыдущей вершины.

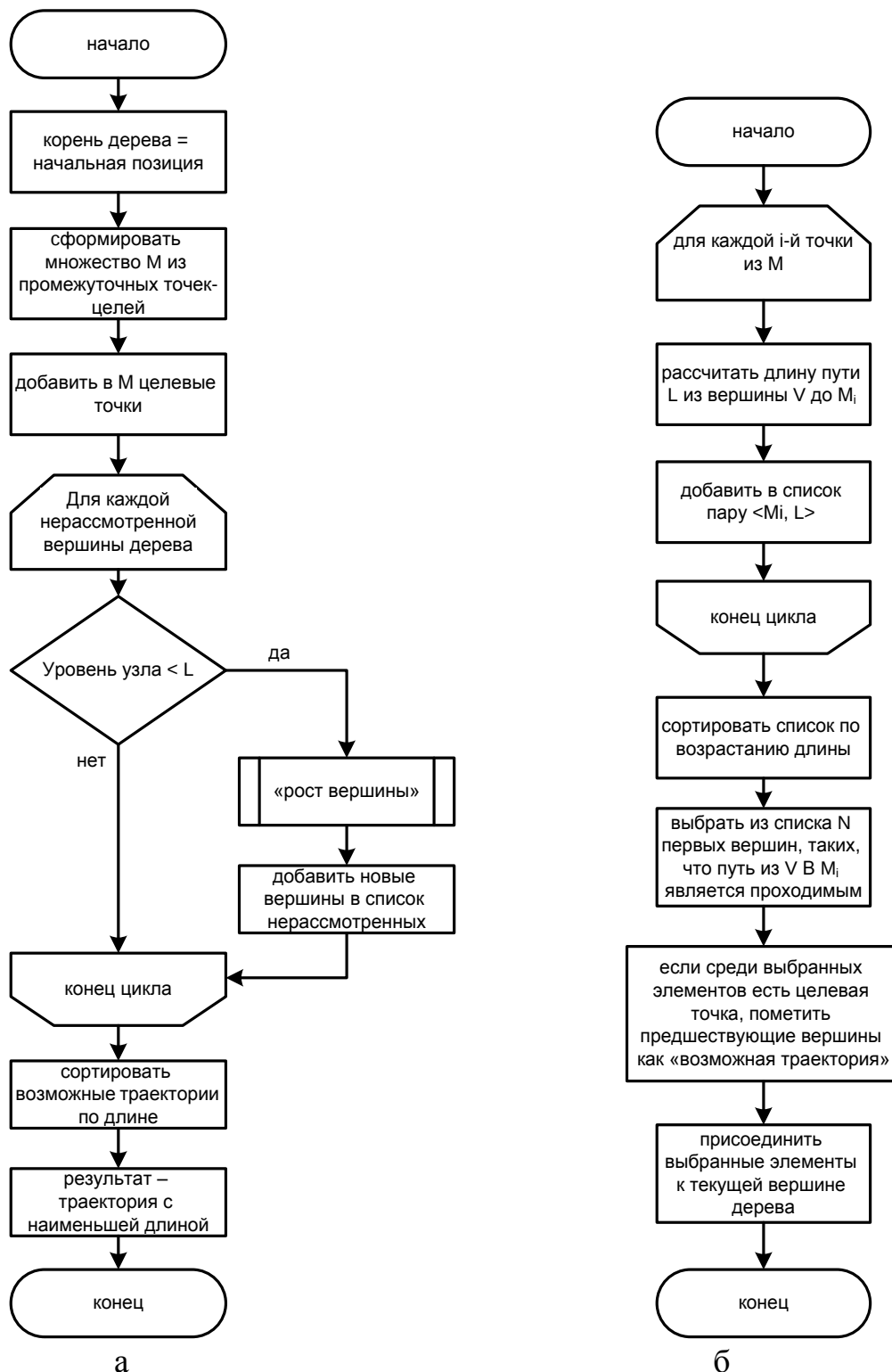


Рисунок 6 – Схема алгоритма планирования локальной траектории автомобиля: а) рост дерева, б) рост вершины

Для сокращения объёма вычислений алгоритм CL-RRT был модифицирован следующим образом:

- выбор промежуточных состояний осуществляется из множества точек, лежащих не на всей карте проходимости, а лишь в некоторой области впереди автомобиля;

- карта проходимости уточняется в реальном времени на основе данных лазерного сканирующего дальномера, позволяющего оценить обстановку по направлению движения автомобиля на глубину до 70 м в секторе 180° с угловым разрешением $0,25^\circ$.

Выборка точек основана на проверке проходимости в случайной точке с координатами, рассчитанными по формулам

$$s_x = x_0 + r \cos \theta, \quad s_y = y_0 + r \sin(\theta),$$

где $r = \sigma_r |n_r| + r_0$, $\theta = \sigma_\theta n_\theta + \theta_0$, n_r и n_θ – скалярные случайные величины, распределённые по нормальному закону, σ_r и σ_θ – коэффициенты, характеризующие разброс точек в продольном и поперечном направлениях относительно положения автомобиля x_0, y_0, θ_0 соответственно, r_0 и θ_0 – центр области разброса точек.

Для планирования траектории осуществляется выполнение алгоритма «роста дерева», который итеративно вызывает подпрограмму «рост вершины».

Результат работы алгоритма планирования локальной траектории автомобиля представлен на рис. 7. На рис. 7,а показан пучок траекторий, полученный с учетом проходимости местности. Темные фигуры обозначают известные препятствия на пути движения; результат планирования обозначен темной линией. Процесс формирования опорных точек с учетом динамической карты проходимости представлен на рис. 7,б (темный фон – проходимые участки).

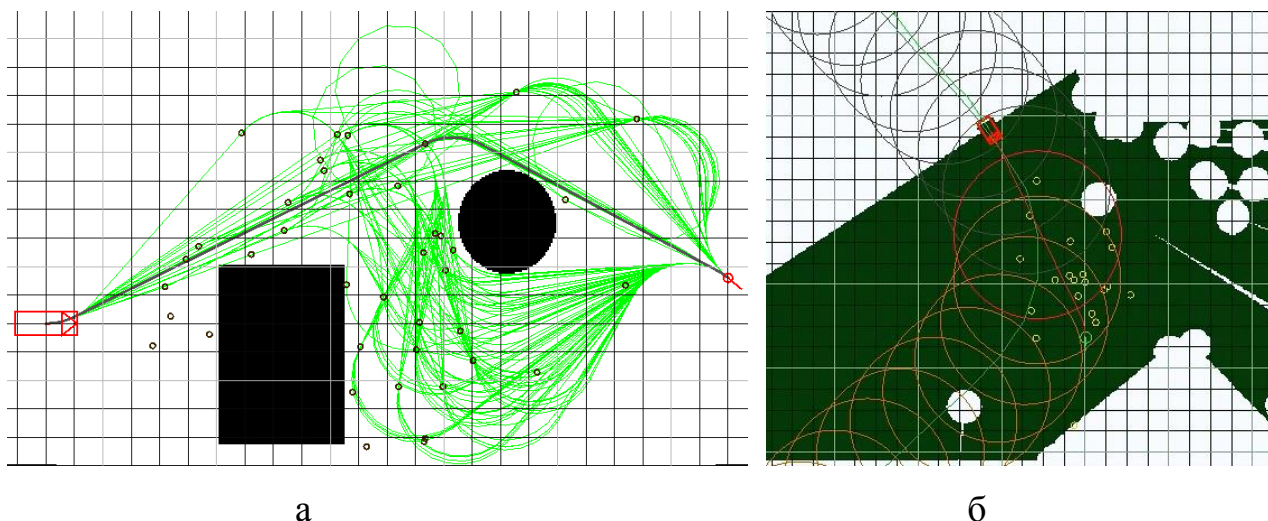


Рисунок 7 – Визуализация работы модифицированного алгоритма CL-RRT:
а) выбор траектории, б) формирование опорных точек с учетом динамической карты проходимости

Алгоритм осуществляет планирование траектории в реальном времени и учитывает неголономность транспортного средства. Подпрограмма планирования локальной траектории была реализована на С++ и выполнялась на компьютере с процессором Core-i5 3.0ГГц. Частота работы алгоритма была 5Гц, что обеспечило автономное управление автомобилем на скорости до 20 км/ч.

Четвертая глава посвящена аппаратно-программной реализации и экспериментальному исследованию информационно-измерительной и управляющей системы, структурная схема которой приведена на рис. 8. На данном рисунке используются следующие сокращения:

КЭД – коллекторный электродвигатель,
МАЭ – магнитный абсолютный энкодер,
ОИЭ – оптический инкрементный энкодер,
ОАЭ – оптический абсолютный энкодер,
ДХ – концевой датчик Холла,
ДС – датчик силы,
УСК – универсальный силовой контроллер,
БК – бортовой компьютер,
ЦМР – цифровой модуль радиоканала,
ШБУ – штатный блок управления,
УМСП – универсальный мультисенсорный преобразователь,
ИНС – инерциальная навигационная система,
КЛС – лазерный сканер с круговой диаграммой направленности,
РА – разъем антенны,
ЦМР – цифровой модуль радиоканала,
ВД – видеодатчик,
М – клеммы подключения электродвигателей,
И – импульсный вход,
А – аналоговый вход,
КДР – комбинируемый дифференциальный разъем,
ШДО – штатный датчик частоты оборотов,
ШДС – штатный датчик средней скорости вращения ведущих колес,
ЗС – звуковая сигнализация,
СС – световая сигнализация,
СК – разъем сухого контакта,
ИБП – источник бесперебойного питания,
БЭГ – бензоэлектрогенератор,
ШЭГ – штатный электрогенератор,
ШАБ – штатная аккумуляторная батарея,
АБ – дополнительная аккумуляторная батарея,
ЭП – подсистема энергопитания,
РЦМР – разъем цифрового радиоканала.

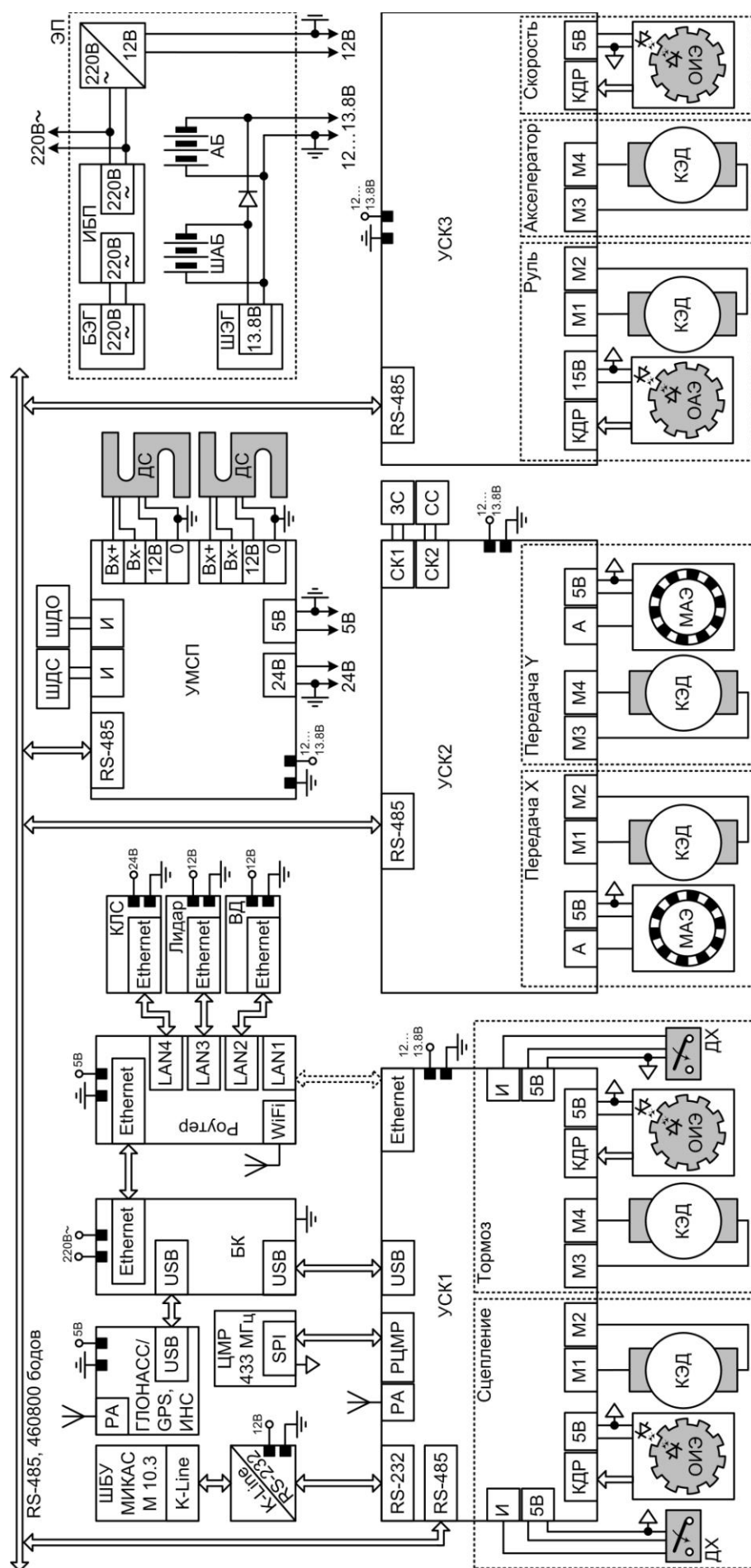
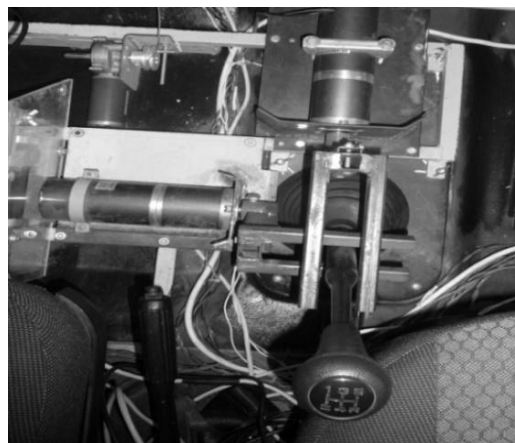


Рисунок 8 – Структурная схема информационно-измерительной и управляющей системы

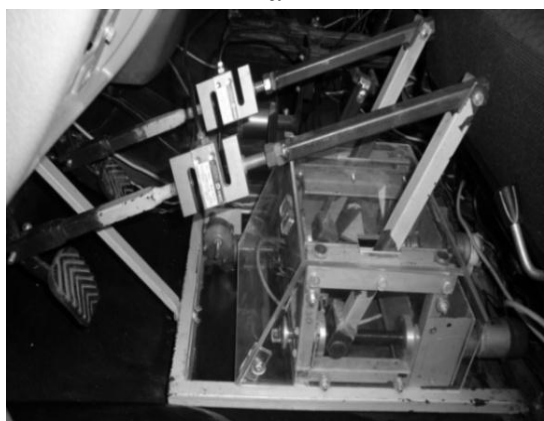
Рис. 9 демонстрирует входящие в состав информационно-измерительной и управляющей системы исполнительные подсистемы.



а



б



в



г

Рисунок 9 – Исполнительные подсистемы автопилота: а) силовая, б) переключения передач, в) управления сцеплением, тормозом и акселерацией, г) руления

Испытания автономных систем управления транспортными средствами могут привести к серьезному ущербу, в том числе к травмам людей, если тестирование пошло не по сценарию. По этой причине особого внимания заслуживает подсистема безопасности, которая предусматривает специальные средства немедленного останова автомобиля-робота при нештатных ситуациях. К ним относятся легкодоступные кнопки по периметру борта автомобиля, нажатие на которые приводит к разрыву цепи зажигания. Благодаря конструкции электро-механических приводов автономной системы, которая оставляет возможность штатного управления автомобилем, оператор может в любой момент времени перехватить на себя управление транспортным средством непосредственно на месте водителя или опосредованно с помощью любого из дублирующих независимых пультов, работающих на частотах 433МГц и 2,4ГГц (WiFi). В случае потери связи с этими пультами автомобиль-робот немедленно прекращает движение. Помимо этого, движение транспортного средства сопровождается световой и звуковой сигнализацией.

В заключении приведены основные научные и практические выводы по работе.

1. Разработана бортовая информационно-измерительная и управляющая система автопилота, автоматизирующая циклические тестовые заезды серийно выпускаемого автомобиля.

2. Создано аппаратное обеспечение беспилотной системы управления автомобилем с механической коробкой передач.

3. Синтезирован регулятор, управляющий сцеплением, тормозом и акселератором автомобиля на основе нечеткой логики, позволяющий реализовывать сценарии старта автомобиля на ровной и наклонной поверхностях и сокращающий временной интервал начала движения в среднем на 18 % по сравнению с водителем-испытателем.

4. На основе модификации алгоритма CL-RRT разработано программное обеспечение, позволяющее планировать и корректировать траекторию движения автомобиля-робота в реальном времени с частотой 5 Гц, что обеспечивает движение на скоростях до 20 км/ч.

5. Сконструирован и изготовлен экспериментальный образец системы управления, установленный на автомобиль «ГАЗель-Бизнес», позволяющий исследовать различные режимы системы, соответствующие различным стратегиям управления.

6. Экспериментальный образец системы управления прошел апробацию в ходе полевых испытаний на полигоне «Березовая пойма» автозавода «ГАЗ» в г. Нижний Новгород.

7. Достигнута точность позиционирования транспортного средства на заданной траектории в условиях испытательного полигона, характеризующаяся предельным отклонением, не превышающим 1,3 м.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Нгуен Т.Н. Аппаратное обеспечение вероятного подхода в мобильной робототехнике / Т.Н. Нгуен, С.А. Голь, В.Е. Корнеев // Информационно-измерительная и биомедицинская техника: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.35 – 49.
2. Нгуен Т.Н. Аспекты построения регулятора с упреждающим управлением на примере сцепления трансмиссии автомобиля-робота / Т.Н. Нгуен, В.Е. Корнеев // Информационно-измерительная и биомедицинская техника: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.58 – 69.
3. Применение сигма-точечного фильтра Калмана для оценки положения автомобиля-робота в пространстве / Т.Н. Нгуен, Ю.С. Глазунова, С.А. Голь, В.С. Леушкин // Информационно-измерительная и биомедицинская техника: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.70 – 79.

4. Нгуен Т.Н. Опционально наполняемый, масштабируемый комплекс универсальных силовых контроллеров и мультисенсорных преобразователей для мобильной робототехники / Т.Н. Нгуен, С.А. Голь, В.Е. Корнеев // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета № 4 (вып. 46), Ч.3. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.5 – 11.
5. Нгуен Т.Н. Аппаратное обеспечение беспилотной системы управления автомобилем с механической коробкой передач / С.А. Голь, Т.Н. Нгуен, А.А. Погудаев // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета № 4 (вып. 46), Ч.3. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.12 – 18.
6. Нгуен Т.Н. Планирование локальной траектории автомобиля-робота в реальном времени / Т.Н. Нгуен, В.И. Жулев, В.С. Леушкин // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета № 4 (вып. 46), Ч.3. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.18 – 23.
7. Нгуен Т.Н. Применение ансамбльного фильтра Калмана для оценки положения автомобиля-робота / Т.Н. Нгуен, Ю.С. Глазунова, С.А. Голь, В.С. Леушкин // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета № 4 (вып. 46), Ч.3. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.23 – 28.
8. Нгуен Т.Н. Нечёткий контроллер электропривода сцепления и акселерации для управления стартом автомобиля-робота на наклонной поверхности / Т.Н. Нгуен // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета № 4 (вып. 46), Ч.3. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.42 – 50.
9. Нгуен Т.Н. Нечеткий регулятор сцепления и акселерации автономной системы управления автомобиля-робота «ГАЗель БИЗНЕС» / Т.Н. Нгуен, С.А. Голь // Материалы Всероссийской НТК студентов, молодых учёных и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях». – Рязань: РГРТУ, 2013 г. – С.297 – 299.
10. Нгуен Т.Н. Сценарий управления началом движения автомобиля-робота / Т.Н. Нгуен, С.А. Голь, В.И. Жулев // Материалы докладов Всероссийской НТК «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы», Ч.2. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С.296 – 298.

Соискатель



Т.Н. Нгуен

Нгуен Туан Нгок

БОРТОВАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА БЕСПИЛОТНОГО
АВТОМОБИЛЯ ДЛЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕСТОВЫХ ЗАЕЗДОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __04.2014 Формат бумаги 60*84 1/16.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО фирма «Интермета»
390000, Рязань, ул. Семинарская, 3. Тел.: (4912) 25-81-76