

Государственный научный центр Российской Федерации –  
Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-  
исследовательский автомобильный и автомоторный институт»  
(ФГУП «НАМИ»)

На правах рукописи

**ЕНДАЧЕВ Денис Владимирович**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВОЛИНЕЙНОГО  
ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ**

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент,  
Нагайцев Максим Валерьевич

Москва, 2016 г.

## Содержание

	стр.
<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ .....</b>	
	11
1.1 Анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных созданию беспилотных автотранспортных средств.....	13
1.2 Анализ автоматических систем управления движением беспилотными АТС.....	31
1.3 Анализ условий эксплуатации.....	48
1.4 Цель и задачи исследования.....	50
<b>ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА.....</b>	
	52
2.1 Требования к математической модели движения беспилотного АТС.....	52
2.2 Математическая модель динамики беспилотного АТС на базе автомобиля «LADA-Калина».....	55
2.3 Математическое моделирование систем управления движением беспилотного АТС.....	86
2.4 Программная реализация разработанных математических моделей.....	90
2.5 Моделирование управляющих воздействий.....	94
2.6 Математическое моделирование регистрирующих и измерительных устройств системы управления движением беспилотного АТС.....	102
2.4 Выводы.....	117

<b>ГЛАВА 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА.....</b>	118
3.1 Методика проведения имитационных испытаний по оценке маневренности, управляемости и устойчивости беспилотного АТС.....	118
3.2 Результаты теоретических исследований динамики беспилотного АТС при выполнении типового маневра на опорном основании с высокими сцепными свойствами.....	120
3.3 Результаты теоретических исследований динамики беспилотного АТС при выполнении типового маневра на опорном основании с низкими сцепными свойствами .....	130
3.4 Теоретические исследования движения беспилотного АТС по заданному маршруту .....	140
3.5 Результаты теоретических исследований движения беспилотного АТС по заданному маршруту.....	143
3.4 Выводы.....	145
<b>ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТИПОВЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА .....</b>	147
4.1 Цели и задачи экспериментальных исследований.....	147
4.2 Аппаратурно-измерительная часть.....	152
4.3 Условия и методики проведения экспериментальных исследований.....	156
4.4 Результаты экспериментальных исследований. Оценка адекватности математической модели.....	162
4.5 Выводы.....	172
<b>ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....</b>	173
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	176

## ВВЕДЕНИЕ

### *Актуальность темы исследования*

Для развития различных отраслей экономики и обеспечения обороноспособности особое значение имеет решение транспортных задач в условиях не пригодных для человека. Особая роль в решении этой проблемы отводится беспилотным транспортным средствам.

Беспилотный автомобиль – транспортное средство, оборудованное системой автоматического управления, которое может передвигаться без участия человека.

Активная разработка беспилотных АТС ведущими зарубежными автопроизводителями началась в 80-ых годах 20-го века. Объектами исследований данного направления являются легковые автомобили, грузовой транспорт, сельскохозяйственная техника, техника военного назначения, «внутризаводской» транспорт, обеспечивающий ведение всех транспортных работ в современных логистических центрах и на складских территориях.

Работы по созданию беспилотных автомобилей ведут все мировые автопроизводители, особенно в США, Германии, Японии, Италии, Китае, Великобритании, Франции, Корее (автоконцерны General Motors, Ford, Mercedes-Benz, Volkswagen, Audi, BMW, Volvo, Cadillac). Значительный объем работ проводится по закрытой тематике в рамках оборонного заказа, и по этой причине результаты исследований практически не публикуются в открытой печати. Сложные наукоемкие технические решения, программное обеспечение, датчики систем управления беспилотных АТС во многих странах отнесены к продукции двойного назначения.

Основными преимуществами беспилотных АТС являются:

- возможность перевозки грузов в опасных зонах, во время природных и техногенных катастроф или военных действий;
- снижение затрат на транспортировку грузов и пассажиров;

- снижение затрат на топливо и более эффективное использование пропускной способности дорог за счёт централизованного управления транспортным потоком;
- экономия временных ресурсов;
- расширение возможностей использования автомобиля для людей с ограниченными возможностями;
- минимизация ДТП и числа человеческих жертв в них.

Реализация преимуществ беспилотных АТС не может быть достигнута без эффективной работы систем управления движением, которая ограничена быстродействием измерительных, вычислительных и исполнительных устройств.

Работа посвящена решению научной проблемы, связанной с обеспечением безопасности движения беспилотного АТС.

### ***Степень проработанности проблемы***

Ряд систем автоматического управления транспортным средством полагается на вспомогательную инфраструктуру (например, использование сенсоров, встроенных в дорогу), однако более прогрессивные технологии позволяют симулировать присутствие человека на уровне принятия решений об ориентации транспортного средства и величины скорости движения, благодаря набору камер, сенсоров, радаров и систем спутниковой навигации.

Существует два основных направления создания таких систем:

1. комплексная автоматизация автомобиля;
2. автоматизация отдельных режимов движения транспортного средства (парковка, движение в пробках, перемещение по автомагистрали).

Комплексный подход к созданию беспилотного автомобиля на сегодняшний день реализуют только две компании – Google и РобоСиВи.

В настоящее время разрабатываются и внедряются различные системы автоматической парковки, обеспечивающие параллельную и (или) перпендикулярную парковку автомобиля в автоматическом режиме.

Парковочный автопилот имеют в активе BMW, Ford, Mercedes-Benz, Nissan, Opel, Toyota, Volkswagen.

Дальнейшее совершенствование системы адаптивного круз-контроля в перспективе позволит реализовать автоматический режим движения автомобиля в пробках. В данном направлении проводят исследования компании Audi, Ford. Разработки BMW, Cadillac по автоматизации движения автомобиля по автомагистрали основываются на существующих системах активной безопасности.

Анализ систем управления беспилотных АТС выявил большое число проблем, возникающих перед конструкторами в процессе их разработки и при определении требований, предъявляемых к системе управления, что обусловлено следующим объективными факторами: достаточно высокой погрешностью, невозможностью большинства систем учитывать непрерывно изменяющиеся в процессе движения внешние условия, функциональной ограниченностью систем управления в связи с использованием внешних источников информации, определяющих положение транспортного средства в пространстве. В то же время очевидно, что качество работы системы управления напрямую определяет безопасность движения, и разработчики на стадии проектирования техники обязаны определить эксплуатационный скоростной диапазон, в котором вероятность возникновения аварийной ситуации минимальна.

В этой связи задача прогнозирования характеристик криволинейного движения беспилотных АТС на стадии проектирования с учетом временных задержек измерительных, вычислительных и исполнительных устройств является актуальной.

### ***Цель работы***

Обеспечение безопасности движения беспилотных АТС в заданной внешней среде за счет выбора рациональных параметров систем управления движением на стадии проектирования техники.

### ***Основные задачи выполняемой работы***

Проведенный в первой главе анализ работ, посвященных созданию беспилотных АТС, по вопросам систем управления, а также математическому моделированию движения колесных транспортных средств, подтвердил актуальность прогнозирования характеристик криволинейного движения беспилотных АТС, базирующихся на имитационном математическом моделировании.

Выполненные в первой главе исследования позволили для достижения цели работы обосновать необходимость решения следующих научных задач:

- провести обзор и анализ информации, касающейся разработок беспилотных АТС в отечественном и зарубежном автомобилестроении;
- разработать математическую модель динамики беспилотного АТС с учетом особенностей функционирования систем управления движением;
- разработать метод выбора рациональных параметров систем управления движением беспилотного АТС на стадии проектирования;
- провести экспериментальные исследования движения беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina» с целью оценки адекватности и точности разработанной математической модели;
- провести теоретические исследования динамики беспилотного АТС на совокупности дорожных условий при выполнении типовых маневров при различных параметрах системы управления движением;
- обосновать выбор технических решений для реализации систем управления беспилотным АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina».

Решению этих задач посвящены остальные главы диссертационного исследования.

***Научная новизна*** результатов исследований, выносимых на защиту, заключается:

- в создании математической модели криволинейного движения беспилотного АТС по ровному горизонтальному недеформируемому опорному основанию, пригодной для исследования влияния временных задержек, связанных с

качеством работы систем управления, на безопасность движения. Модель отличается от известных учетом работы регистрирующей и вычислительной аппаратуры, а также исполнительных устройств;

- в методе выбора рациональных параметров систем управления движением беспилотными АТС, позволяющем определить границы безопасного выполнения маневров на стадии проектирования техники;
- в результатах теоретических исследований криволинейного движения беспилотного АТС при заданных управляющих воздействиях, соответствующих выполнению как стандартизованных испытаний (маневр «Переставка»), так и оригинальных (движение по заранее заданному маршруту), на опорных основаниях с различными сцепными свойствами и при различных временных задержках по исполнению управляющего сигнала.

### ***Практическая ценность работы***

На основе результатов выполненных исследований для практического использования при разработке систем управления движением беспилотным АТС создан комплекс программ для ЭВМ. Использование комплекса позволяет имитировать динамику беспилотного АТС и проводить оценку влияния задержки управляющего воздействия на безопасность движения в различных дорожных условиях, в результате чего возможно обосновано подходить к формированию технических требований к системам управления движением, что позволяет обеспечить безопасность при эксплуатации беспилотных АТС. Полученные в работе результаты использованы при создании беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina» в рамках ПНИ ГНЦ ФГУП «НАМИ» при финансовой поддержке Минобрнауки России, соглашение №14.625.21.0006, уникальный идентификатор проекта RFMEFI62514X0006.

### ***Методология и методы исследования***

Исследования проводились с использованием численных методов моделирования движения беспилотного АТС с учетом особенностей системы управления движением. Экспериментальные исследования проведены с

использованием современных методов испытаний автомобильной техники на устойчивость и управляемость при установившемся криволинейном движении и при движении по переходным траекториям. В качестве объекта исследований выбрано беспилотное АТС, созданное в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina».

### ***Основные положения, выносимые на защиту***

- математическая модель криволинейного движения беспилотного АТС по ровному горизонтальному недеформируемому опорному основанию, пригодная для исследования влияния временных задержек, связанных с качеством работы систем управления, на безопасность движения. Модель отличается от известных учетом работы регистрирующей и вычислительной аппаратуры, а также исполнительных устройств;
- метод выбора рациональных параметров систем управления движением беспилотными АТС, позволяющий определить границы безопасного выполнения маневров на стадии проектирования техники;
- результаты теоретических исследований криволинейного движения беспилотного АТС при заданных управляющих воздействиях, соответствующих выполнению как стандартизованных испытаний (маневр «Переставка»), так и оригинальных (движение по заранее заданному маршруту), на опорных основаниях с различными сцепными свойствами и при различных временных задержках по исполнению управляющего сигнала.

### ***Степень достоверности результатов работы***

Достоверность результатов, полученных в данной работе, подтверждается сопоставлением расчетных данных с результатами экспериментальных исследований движения беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina».

### ***Апробация работы***

Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались:

- на научно-технических семинарах ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» в 2012...2015 гг. (г. Москва);
- на международной конференции Ассоциации автомобильных инженеров «Техническое регулирование в области транспортных средств» в 2012-2015 (г. Дмитров);
- на международных научных симпозиумах МГМУ «МАМИ» в 2012-2015 гг. (г. Москва);
- на международном форуме «Проблемы энергосбережения и экологии автомобильной техники» (ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва, 2013 г.).

### ***Публикации***

По материалам диссертации опубликовано 10 научных работ, из которых 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

### ***Структура и объем работы***

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 183 листах машинописного текста, содержит 95 рисунков, 7 таблиц. Библиография работы содержит 93 наименования.

## **ГЛАВА 1. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Беспилотный автомобиль – транспортное средство, оборудованное системой автоматического управления, которое может передвигаться без участия человека.

Активная разработка беспилотных АТС ведущими зарубежными автопроизводителями началась с 1980-х годов для легковых автомобилей, грузового транспорта, сельскохозяйственной техники и автотранспорта военного назначения, «внутризаводского» транспорта, обеспечивающего ведение всех транспортных работ в современных логистических центрах и на складских территориях.

Созданием беспилотных АТС занимаются практически все ведущие автопроизводители мира, особенно в США, Германии, Японии, Италии, Китае, Великобритании, Франции, Корее (автоконцерны General Motors, Ford, Mercedes-Benz, Volkswagen, Audi, BMW, Volvo, Cadillac). Значительный объем работ проводится по закрытой тематике по оборонным заказам и по этой причине результаты работ практически не публикуются в открытой печати. Сложные наукоемкие технические решения, программное обеспечение, датчики систем управления беспилотным АТС во многих странах отнесены к продукции двойного назначения.

Основные преимущества беспилотных АТС:

- перевозка грузов в опасных зонах, во время природных и техногенных катастроф или военных действий;
- снижение стоимости транспортировки грузов и людей за счёт экономии на заработной плате водителей;
- более экономичное потребление топлива и использование дорог за счёт централизованного управления транспортными потоками;

- экономия времени, затрачиваемого на управление транспортным средством;
- возможность самостоятельно перемещаться на автомобиле людям с ограниченными способностями;
- минимизация ДТП за счет «человеческого фактора»;
- повышение пропускной способности дорог за счётужения ширины дорожных полос;

Некоторые системы автоматического управления полагаются на вспомогательную инфраструктуру (например, сенсоры, встроенные в дорогу или около неё), но более продвинутые технологии позволяют симулировать присутствие человека на уровне принятия решений о рулении и скорости, благодаря набору камер, сенсоров, радаров и систем спутниковой навигации.

Существует два основных направления создания таких систем:

- комплексная автоматизация автомобиля;
- автоматизация отдельных режимов движения транспортного средства (*парковка, движение в пробках, перемещение по автомагистрали*).

Комплексный подход к созданию беспилотного автомобиля в настоящее время реализуют только две компании – Google [1] и компания РобоСиВи [2].

В настоящее время разрабатываются и внедряются различные системы автоматической парковки, обеспечивающие параллельную и (или) перпендикулярную парковку автомобиля в автоматическом режиме. Парковочный автопилот имеют в активе BMW, Ford, Mercedes-Benz, Nissan, Opel, Toyota, Volkswagen.

Дальнейшее совершенствование системы адаптивного круиз-контроля позволяет реализовать автоматический режим движения автомобиля в пробках. В данном направлении работают Audi, Ford. Другим направлением является автоматизация движения автомобиля по автомагистрали. Разработки BMW, Cadillac основываются на существующих системах активной безопасности.

## 1.1 Анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных созданию беспилотных автотранспортных средств

В настоящее время система автоматического управления от Google реализована на шести опытных автомобилях Toyota Prius (рис. 1.1), Lexus RX 450h и Audi TT, которые проехали в беспилотном режиме свыше 450000 км. Для реализации функций автоматического управления, система включает в себя следующие входные устройства: лидар, радары, видеокамера, датчик оценки положения, инерционный датчик движения, GPS приемник.



Рисунок 1.1 – Беспилотный автомобиль Google на базе Toyota Prius

Лидар сканирует область вокруг автомобиля на расстоянии более 60 м и создает точную трехмерную картину его окружения. Лидар представляет собой вращающийся датчик на крыше автомобиля.

Радары помогают определить точное положение удаленных объектов. На автомобиле установлены четыре радара, три из которых расположены в передней части, а один радар – сзади.

Видеокамера определяет сигналы светофора и позволяет блоку управления распознавать движущиеся объекты, в т.ч. пешеходов и велосипедистов. Видеокамера располагается на лобовом стекле за зеркалом заднего вида.

Датчик оценки положения фиксирует движение автомобиля и помогает определить его точное местоположение на карте. Датчик оценки положения установлен на левом заднем колесе.

Инерционный датчик движения измеряет направление ускорения или замедления, продольный и поперечный крен кузова автомобиля, при его движении. Используется датчик системы курсовой устойчивости.

Сигналы от входных устройств передаются в электронный блок управления, где производится их обработка в соответствии с заложенной программой и формирование управляющих воздействий на исполнительные устройства. В качестве исполнительных устройств используются конструктивные элементы рулевого управления, тормозной системы, системы курсовой устойчивости, системы управления двигателем.

Система автоматического управления от российской компании РобоСиВи включает два основных блока – навигационный комплекс ГЛОНАСС и комплекс технического зрения.

В настоящее время производится тестирование системы на малогабаритной модели, в которой реализованы функции прокладки маршрута, трогания с места, маневрирования, торможения при возникновении препятствия (транспортное средство, люди).

В рамках проекта HAVit (Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport – Высокоавтоматизированные автомобили для интеллектуального транспорта) в 2011 году была представлена полуавтоматическая система Temporary Auto Pilot [3], ТАР (Временный автопилот). Система позволяет водителю в определенных условиях отдать управление автомобилем под контроль автоматики. По своей сути система является промежуточным этапом на пути к роботизированному автомобилю.



Рисунок 1.2 – Автомобиль Volkswagen с полуавтоматической системой  
Temporary Auto Pilot

Система ТАР объединяет в единое целое уже известные разработки Volkswagen: систему адаптивного круиз-контроля, систему помощи движению по полосе, систему распознавания дорожных знаков. В своей работе система Временного автопилотирования использует стандартные входные устройства перечисленных систем активной безопасности: лидар, радар, видеокамеру, ультразвуковые датчики.

Сигналы от входных устройств передаются в электронный блок управления, который с помощью исполнительных механизмов реализует следующие автоматические функции:

- поддержание безопасного расстояния до впереди идущего автомобиля;
- остановка и трогание с места;
- движение по полосе;
- распознавание знаков ограничения скорости и приведение скорости в соответствие с требованиями знака.

Система обеспечивает оптимальную степень автоматизации в зависимости от дорожной ситуации и состояния водителя, тем самым способствует безаварийному движению. Система работает на скорости до 130 км/ч. Система TAP полностью готова для внедрения на серийные автомобили.

Система Traffic Jam Assistant от Audi - первая серийная система автопилота для движения в пробках [4]. Система автоматически поддерживает дистанцию до впереди идущей машины, тормозит, разгоняется, поворачивает, объезжает препятствия и даже уступает дорогу машинам экстренных служб. Конструктивно автопилот для пробок построен на основе адаптивного круиз-контроля и работает на скорости от 0 до 60 км/ч.



Рисунок 1.3 - Серийный автомобиль Audi с системой Traffic Jam Assistant

Система объединяет ряд входных устройств: два радара, широкоугольную видеокамеру и восемь ультразвуковых датчиков. Радары сканируют определенные секторы на расстоянии 250 м. Видеокамера определяет дорожную разметку и различные препятствия. Ультразвуковые датчики контролируют пространство спереди, сзади и сбоку автомобиля. В любой момент работы системы водитель может взять управление автомобилем на себя.

Систему автоматического движения в пробках готовит Ford и планирует ее использование на серийных автомобилях к 2017 году. Система Traffic Jam Assist включает радар и камеру, которые отслеживают движение соседних машин. Электронный блок управления выбирает нужную скорость и обеспечивает движение автомобиля в потоке.

Компания BMW работает над системой Connected Drive Connect (CDC) [5], предназначеннной для движения по автомагистрали. Система CDC включает ультразвуковой датчик, камеру, радары и лидар, сигналы от которых обрабатываются в электронном блоке управления. В результате воздействия на исполнительные механизмы различных систем автомобиля, изменяется его скорость и траектория движения. Помимо этого, система не превышает разрешенной на участке скорости, не производит обгон справа, а также возвращает автомобиль в свой ряд после обгона. В общем, в автопилоте реализован алгоритм идеального водителя. По заявлению компании система пока не готова к серийному применению.



Рисунок 1.4 – Автомобиль BMW с системой Connected Drive Connect

Система автоматического управления Super Cruise от Cadillac обеспечивает движение автомобиля по автомагистрали. Она позволяет осуществлять маневрирование, торможение, движение по полосе без участия водителя [6].



Рисунок 1.5 – Автомобиль Cadillac с системой Super Cruise

Система построена на ряде готовых решений компании: адаптивном круиз-контроле, системах автоматического экстренного торможения, предупреждения о столкновении, помощи движению по полосе, помощи при перестроении, активного головного света и др.

Текущее положение автомобиля оценивается с помощью входных устройств – радара, ультразвуковых датчиков, камеры и системы GPS. Разработчик отмечает, что эффективность работы системы зависит от внешних факторов – погода, наличие разметки.

Интересное решение автоматизации движения автомобиля предлагает компания Volvo. Система Safe Road Trains for the Environment (SARTRE) позволяет нескольким машинам двигаться по дороге в организованной колонне [7]. Автомобили идут за головной машиной, в качестве которой выбирается грузовой автомобиль с водителем-профессионалом. Автомобили выстраиваются с дистанцией 6 м и полностью повторяют движение ведущего

грузовика, что позволяет водителем отдохнуть, покушать, поговорить по телефону.



Рисунок 1.6 – Организованное движение нескольких машин с системой  
Safe Road Trains for the Environment

По желанию каждый из автомобилей в любой момент может покинуть группу. Для создания системы SARTRE используются наработки Volvo в области активной безопасности, в т.ч. адаптивный круиз-контроль. В настоящее время система находится в стадии испытаний.

Разработка беспилотных АТС гражданского назначения для эксплуатации в условиях организованного и неорганизованного дорожного движения является наиболее сложной задачей. Пример блок-схемы программного обеспечения системы управления «беспилотного» автомобиля Stanley первого поколения представлен на рис. 1.7.

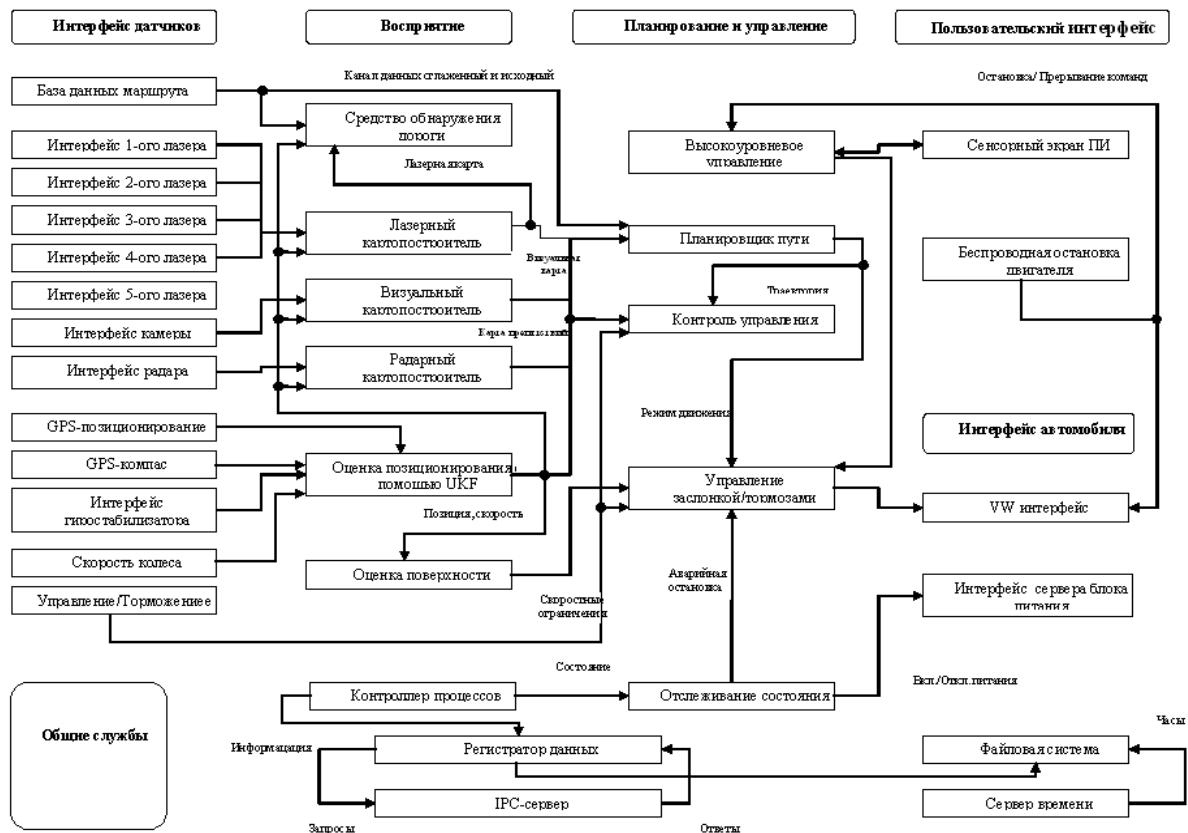


Рисунок 1.7 – Принципиальная блок-схема программного обеспечения системы управления беспилотного АТС Stanley

Анализ успешно реализованных проектов в США, Италии, Германии и других странах беспилотных АТС позволяет выделить общую архитектуру программного обеспечения беспилотных автомобилей, которая состоит из следующих операций:

- получение и обработка данных с датчиков;
- объединение и согласование полученных данных;
- обработка изображений;
- определение характеристик препятствий, дорожных условий и автомобилей в направлении их движения;
- определение характеристик дорожного полотна;
- построение цифровой карты.
- позиционирование автомобиля и определение текущего состояния системы;

- принятие решений;
- управление исполнительными устройствами;
- ведение журнала полученных данных для последующего анализа.

В наиболее сложных системах, таких как системы управления движением Google, Volkswagen, Cadillac и агентства DARPA [8], программное обеспечение делится на два уровня – нижний уровень, отвечающий за взаимодействие с датчиками и исполнительными устройствами и верхний уровень, отвечающий непосредственно за реализацию алгоритма управления движением автомобиля.

Для тестирования в системе управления движением автомобиля проводится моделирование поведения алгоритмов. Оптимальная среда для тестов в этой системе управления – Matlab/Simulink [9], которая позволяет использовать технологию быстрого прототипирования RAD. В данной среде возможно получение Си кода верхнего уровня.

Среда для разработки программного обеспечения (ПО) нижнего уровня различными разработчиками выбирается в зависимости от используемых микропроцессоров. Язык разработки для ПО нижнего уровня – C/C++, C#. Так же, для улучшения быстродействия, в критичных для этого местах фирмы Google и Volkswagen используют вставки кода на языке Assembler.

В целом большинство из ведущих зарубежных автопроизводителей считают, что к 2015-2018 году они могут завершить проведение тестовых испытаний беспилотных АТС, а с 2018-2025 году выйдут на организацию производства беспилотных АТС для эксплуатации на дорогах общего пользования.

На этапах создания беспилотных АТС администрация по безопасности дорожного движения США (National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA) рассматривает пять уровней автоматизации транспортного средства:

1. Неавтоматизированные автомобили (No-Automation, уровень 0): в процессе поездки водитель осуществляет полный и единоличный контроль и

управление тормозами, рулем, дроссельной заслонкой, коробкой передач и сцеплением (при наличии).

2. Частичная автоматизация (Function-specific Automation, Уровень 1): автоматизированная система управления движением выполняет одну или несколько конкретных функций, например, осуществляет электронный контроль устойчивости (ESC) или систему экстренного торможения.

3. Комбинированная автоматизация (Combined Function Automation, Уровень 2): автоматизированная система управления движением выполняет по крайней мере две функции, например, включающие управление системой адаптивного круиз-контроля в сочетании с системой предупреждения водителя о покидании полосы движения.

4. Ограниченнное автономное вождение (Limited Self-Driving Automation, Уровень 3): автоматизированная система управления движением выполняет полный контроль над всеми критически важными функциями безопасности при определенных условиях, при которых в значительной степени водитель осуществляет только контроль за работой системы управления движением. На этом уровне возможно комфортное переключение системы управления автомобилем водителю. Автомобили Google в настоящее время находятся на уровне 3.

5. Полная автоматизация (Full Self-Driving Automation, Уровень 4): автоматизированная система управления движением выполняет все критически важные функции вождения и контроля за дорожной обстановкой в течение всего времени поездки. При таком уровне водитель только задает маршрут движения, но не участвует в управлении движением и не имеет технической возможности управления транспортным средством [10].

В Российской Федерации также ведутся работы по созданию беспилотных АТС.

Одним из ведущих разработчиков является ФГУП «НАМИ», который выполняет НИР по созданию интеллектуальных беспилотных грузопассажирских АТС гражданского назначения. Разработанный ФГУП

«НАМИ» макетный образец беспилотного АТС на базе легкового автомобиля с автоматической коробкой передач представлен на рис.1.8.



Рисунок 1.8 – Макетный образец беспилотного АТС на базе легкового автомобиля

Автомобиль оборудован системой «технического зрения» (см. рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Система «технического зрения» легкового автомобиля

В состав технического «зрения» входит набор видеокамер, радаров дальнего и ближнего действия, лазеры и GPS/Глонасс приемники. С помощью системы технического «зрения» беспилотное АТС по разрабатываемым алгоритмам и программному обеспечению обучается анализу обстановки вокруг себя на расстоянии до 200 м., распознаванию дорожной разметки, дорожных знаков, светофоров, определению движущихся и не движущихся объектов. По записанному маршруту, а также с помощью системы GPS/Глонасс автомобиль может передвигаться вне дорог общего пользования из точки *A* в точку *B* без участия водителя.

Принципы разработки беспилотных грузовых автомобилей практически те же, что и у легковых беспилотных АТС. Система управления движением автомобиля «Terramax» строит трехмерные изображения ландшафта с помощью трех пар видеокамер. Две самые близкие камеры используются на малой скорости и позволяют обнаруживать препятствия на расстояниях до 15 м. На большой скорости робот выбирает пару с наибольшим разнесением камер, чтобы сканировать дистанции от 15 до 50 м. Третья пара обеспечивает сканирование промежуточного расстояния между этими дистанциями. При обнаружении препятствия по мере снижения скорости в системе управления движением автомобиля «Terramax» производится переключение с пары видеокамер большой дальности на пары камер средней, а затем ближней дальности для обнаружения и коррекции движения автомобиля с учетом всех препятствий в поле технического зрения.

В целях экономии топлива японская государственная организация по развитию энергетических и промышленных технологий (New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO) успешно запрограммировала колону из четырех грузовиков, которые двигались на расстоянии четырех метров друг от друга [11]. Таким образом, им удалось сократить сопротивление воздуха и потребление топлива беспилотных грузовиков (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Беспилотные грузовики в Японии

Фирма Gotting KG «Германия» на опытных образцах продемонстрировала собственную технологию автоматизированного управления автомобильной колонной, состоящей из нескольких самосвалов. Первой машиной колонны управляет профессиональный водитель, при этом электронные устройства отслеживают действия водителя и передают их по радиосвязи в виде команд остальным контроллерам, установленным в следующих за первой машиной транспортных средствах. Все ведомые автомобили оборудованы лазерными сканерами для контроля движения впереди идущего автомобиля. Такое решение перспективно в задачах перевозки сельскохозяйственных грузов, добычи полезных ископаемых в горнорудной промышленности, при строительстве дорог, для арктических перевозок и на предприятиях министерства обороны при транспортировке грузов в опасных для жизни и здоровья человека зонах.

Совместно с учеными европейских университетов и специализированных фирм американские конструкторы компании Daimler Chrysler разработали технологию управления колонной беспилотных большегрузных автопоездов, двигающихся по автомагистралям между штатами. Аналогичный проект осуществляет фирма Volvo Truck Corporation с

помощью своей дочерней фирмы Volvo Technology Corporation (рис. 1.11). Специалисты фирмы Volvo считают, что при применении беспилотных грузовых автомобилей в колонне достигаются следующие результаты.



Рисунок 1.11 – Беспилотный автомобиль фирмы Volvo

Достоинства беспилотных грузовых автомобилей фирмы Volvo:

- улучшение дорожной безопасности, так как минимизируется негативное влияние человеческого фактора, который по статистике является причиной почти 80 % (ранее была озвучена цифра в 90 %) дорожно-транспортных происшествий;
- экономия около 20% топлива;
- водители, находящиеся в качестве испытателей в ведомых грузовиках, работают в более комфортных условиях;
- разгрузка автодорог, так как интервалы между автопоездами уменьшаются.

Беспилотный внутризаводской транспорт в развитых странах производится серийно. В Европе и США он обеспечивает эффективное транспортное обслуживание более 1000 логистических центров и складов, на которых работает около 30 тыс. беспилотных АТС.

В частности, финская компания Valtra представила концептуальный трактор Robo Trac [12], который управляет с использованием GNSS-навигаторов и интернета. Транспортное средство предназначено для работы на виноградных полях, кофейных фермах и во фруктовых садах. Оно способно самостоятельно вспахивать землю, обрабатывать почву, сеять семена, орошать посевы (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 - Трактор RoboTrac «Valtra»

Беспилотный трактор, созданный в Бельгии, умеет самостоятельно регулировать скорость и поворачивать, приспосабливаясь к состоянию почвы. В обычном случае от тракториста требуются не только отличные навыки вождения, но и концентрация внимания: нужно постоянно следить за положением трактора, почвой под его колесами и намеченным маршрутом. Роботизированный трактор (рис. 1.13) сконструирован в центре мехатроники Фландрии (FMTС) [13], объединяющем несколько машиностроительных компаний, и Левенском католическом университете. Новый вид сельхозтехники оборудован системами управления педалями акселератора, тормоза и рулевым колесом, а также набором датчиков, включая GNSS-устройство. Поскольку, в отличие от асфальта, на бездорожье скорость

транспортного средства зависит от вида и твердости почвы, инновационную машину оснастили датчиками, которые способны все это отслеживать. На основе полученной информации бортовой компьютер рассчитывает не только приемлемую скорость, но и радиус поворота с точностью до нескольких сантиметров, как уверяет один из участников проекта Грегори Пинте. Само же решение о повороте трактор принимает на основе данных GNSS, поддерживая тем самым заданное направление или маршрут.



Рисунок 1.13 – Беспилотный трактор

Швейцарская фирма Leica Geo systems [14] подписала долгосрочный контракт с китайским производителем спецтехники YTO на поставку своего оборудования для беспилотного управления тракторами (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 - Трактор Leica Geosystem

Компания «John Deere» (США) [15] совместно с немецкими производителями серийно выпускают беспилотные модификации тракторов и комбайнов, которые более 10 лет успешно эксплуатируются на крупных сельскохозяйственных предприятиях США и Европы.

Зарубежные автопроизводители ведут также разработки БАС следующего назначения:

- строительно-дорожная техника (бульдозеры, экскаваторы, грейдеры, краны и т.д.);
- техника для чрезвычайных ситуаций (пожарные машины, внедорожные транспортные средства, машины скорой помощи, спецтехника и т.д.);
- для автотранспортных средств двойного назначения;
- для охраны территорий по периметру (передвижные средства охраны, наблюдения и видеозаписи);
- для обеспечения спортивных мероприятий на кортах для гольфа, в парках и т.п.

Внедрение беспилотных АТС позволит эффективно решать задачи повышения безопасности АТС, снижения числа пробок на дорогах, ДТП,

травм и смертей, снижения расхода топлива, выброса вредных веществ, парниковых газов в атмосферу и повышение уровня комфорта для пассажиров. Базовые технические решения при разработке беспилотных автомобилей могут быть адаптированы и внедрены на серийных АТС. Беспилотный автомобиль является перспективным проектом для гражданского и военного назначения.

## **1.2 Анализ автоматических систем управления движением беспилотными АТС**

### **1.2.1 Состав системы управления беспилотными АТС**

Система управления беспилотным АТС состоит из измерительных, вычислительных и исполнительных устройств рис. 1.15.



Рисунок 1.15 – Структура системы управления беспилотным АТС

Измерительные устройства включают в себя датчики определяющие управляющее воздействие и регистрирующие устройства, определяющие положение беспилотного АТС во внешней среде.

Для функционирования системы управления беспилотного АТС датчики определяющие управляющие воздействия должны контролировать следующие параметры:

- угол поворота руля;
  - угол поворота дроссельной заслонки;
  - усилие нажатия на педаль тормоза;
  - положение селектора управления трансмиссией;
  - скорость движения автомобиля.

Для определения положения беспилотного АТС во внешней среде, необходимы следующие регистрирующие устройства:

- камеры, для кругового видеонаблюдения;

- лидар, для определения препятствия и расстояния до него;
- радар, для определения скорости и расстояния до других автомобилей;
- автомобильная спутниковая система GPS/ГЛОНАСС, для получения данных со спутника о текущем положении беспилотного АТС.

Данные с регистрирующих устройств поступают в ноутбук, где на их основе формируются управляющие сигналы, поступающие в микроконтроллер. Данные с датчиков также поступают в микроконтроллер, где они обрабатываются и передаются в виде управляющих воздействий на исполнительные устройства.

Для воздействия на органы управления движением беспилотного АТС используются следующие типы исполнительных устройств:

- электроусилитель руля (ЭУР), предназначен для изменения направления движения беспилотного автомобиля. ЭУР получает управляющий сигнал от микроконтроллера и в зависимости от значения сигнала передает вращение на вал рулевого управления, меняя тем самым угол поворота колес;
- привод дроссельной заслонки, предназначен для управления движением дроссельной заслонки, которая является конструктивным элементом впускной системы бензиновых двигателей внутреннего сгорания с впрыском топлива и предназначена для регулирования количества воздуха, поступающего в двигатель для образования топливно-воздушной смеси;
- привод педали тормоза, предназначен для управления тормозным усилием на педаль тормоза.

### **1.2.2 Классификация автоматических систем управления**

Автоматические системы управления (АСУ) (рис. 1.16) транспортными средствами наиболее широко исследованы в работах [24, 25]. Состав и свойства АСУ определяются теми задачами, которые необходимо решать при

управлении беспилотным АТС. Применительно к управлению движением транспортных средств, это задачи: планирования движения, выработки и реализации управляющих воздействий, контроля положения машины, ее состояния и режимов работы основных узлов шасси. Однако, несмотря на общность функционального назначения АСУ транспортных средств, их конкретное исполнение и состав решаемых ими задач может быть различным. Кроме того, в зависимости от назначения и конструкции транспортных средств, условий их эксплуатации, потребных функциональных и технических характеристик для решения одних и тех же задач управления могут использоваться разные принципы и элементная база АСУ.



Рисунок 1.16 - Функциональная схема бортовой системы управления

На основе работы [24] все АСУ можно классифицировать:

*1) по возможностям управления автотранспортных средств:*

- автономные, т.е. способные к самостоятельному управлению;
- неавтономные, в которых часть задач управления решается вне транспортного средства;

*2) по числу решаемых задач:*

- одно-функциональные;
- двух-функциональные;
- трех-функциональные;
- многофункциональные – характерны для автономных транспортных средств, поскольку необходимо управлять величиной и направлением вектора скорости движения, контролировать маршрут и положение машины на трассе, обеспечивать безопасность движения и т.д.;

*3) по характеру решаемых задач*

- информационно-советующими - обеспечивают решение задач прогнозирования движения и (или) выработки управляемых воздействий;
- информационно-управляющими - сигналы управления сообщаются водителю для принятия им решений по управлению;
- управляющими автоматизированными приводами управления транспортного средства - этот вариант АСУ свойственен транспортным средствам на начальной стадии их автоматизации, а также неавтономным АСУ;

*4) по уровню автоматизации:*

- ручные;
- автоматизированные;
- автоматические системы;

*5) по принципу действия:*

- разомкнутые – системы программного управления транспортными средствами движущихся по заданным законам вне зависимости от условий движения;
- не имеющие обратной связи;
- замкнутые системы (среда – машина – водитель, среда – водитель – машина - среда, машина - водитель – машина, среда – машина - среда);

*6) по характеру изменения управляемых величин:*

- стабилизирующие АСУ поддерживают заданный уровень регулируемого параметра в пределах заданных отклонений. Иногда стабилизирующие системы называют также системами автоматического регулирования. Примером стабилизирующей АСУ могут быть системы, обеспечивающие постоянство скорости движения, дистанции в колонне транспортных средств, потребляемой мощности, заданной экономичности транспортного средства:

- регулирующие - системы, изменяющие регулируемый параметр по заданным законам, например  $v=f(t)$ ;  $\alpha=f(S)$ , где  $v$  - скорость движения;  $\alpha$  - угол направления движения;  $t$  - время;  $S$  - путь. Наиболее широко регулирующие системы применяются в АСУ программного управления транспортным средством;
- следящие системы, позволяющие изменять регулируемый параметр в зависимости от изменения задающих факторов, например положения органов управления;
- программные АСУ, предусматривают предварительное задание маршрута и (или) режимов движения, реализуемых независимо от изменения внешних условий;
- адаптивные системы предусматривают коррекцию в ходе движения в зависимости от изменения условий, режимов движения или дорожной обстановки.

Приведенная классификация носит примерный характер, однако дает исчерпывающее представление о множестве вариантов АСУ и возможности их объединения в комбинированные системы управления.

### 1.2.3 Программные системы управления

Управляемое движение беспилотного АТС наряду с существованием общих целей предполагает постановку и решение промежуточных задач (локальных целей), в совокупности составляющих план движения. При достаточной степени детализации плана, позволяющей заранее определять положение и режим движения объектов в любой момент времени или траекторию и режимы движения в пространстве, можно говорить уже не о плане, а законе движения. В общем случае программа движения – закон управляемого перехода объекта из одной точки многомерного пространства, характеризуемого множеством параметров  $Q_1(x_i)$ , в другую  $Q_2(x_i)$ .

Точность программного движения характеризуется погрешностью изменения управляемых параметров за определенный период времени или на каком-либо участке пути. Для автоматических транспортных средств это, как правило, траектория движения. Для таких систем условием приемлемой точности работы программной системы управления является соотношение:

$$\delta = |x_{\text{п}}(t, S) - x_{\phi}(t, S)| \leq [\delta],$$

где  $x_n$ ,  $x_{\phi}$  – планируемое и фактическое положение транспортного средства по прошествии времени  $t$  или на участке пути  $S$ ;  $[\delta]$  – допустимая погрешность управления транспортным средством (определяется исходя из условий эксплуатации).

В общем случае условие  $\delta \geq [\delta]$  может отражать погрешность не одного, а совокупности управляемых параметров. Тогда под  $x_n$ ,  $x_{\phi}$  понимается функционал, характеризующий движение транспортного средства [24].

В качестве примера программной системы управления на рис. 1.17 приведена система работающая по жесткой программе. Точность такой системы при движении по участкам  $a$  и  $b$  составит  $\Delta$  по пройденному пути,  $\beta$  – по направлению движения, а погрешность выполнения поворота составит  $\gamma$ .

Тогда суммарное отклонение транспортного средства ( $\delta$ ) от расчетной точки С составит:

$$\delta = \Delta + \beta \cdot (a + b) + \gamma \cdot b,$$

что при протяженности участков  $a$  и  $b$  даже в несколько десятков метров предъявляет очень высокие требования к точности движения.

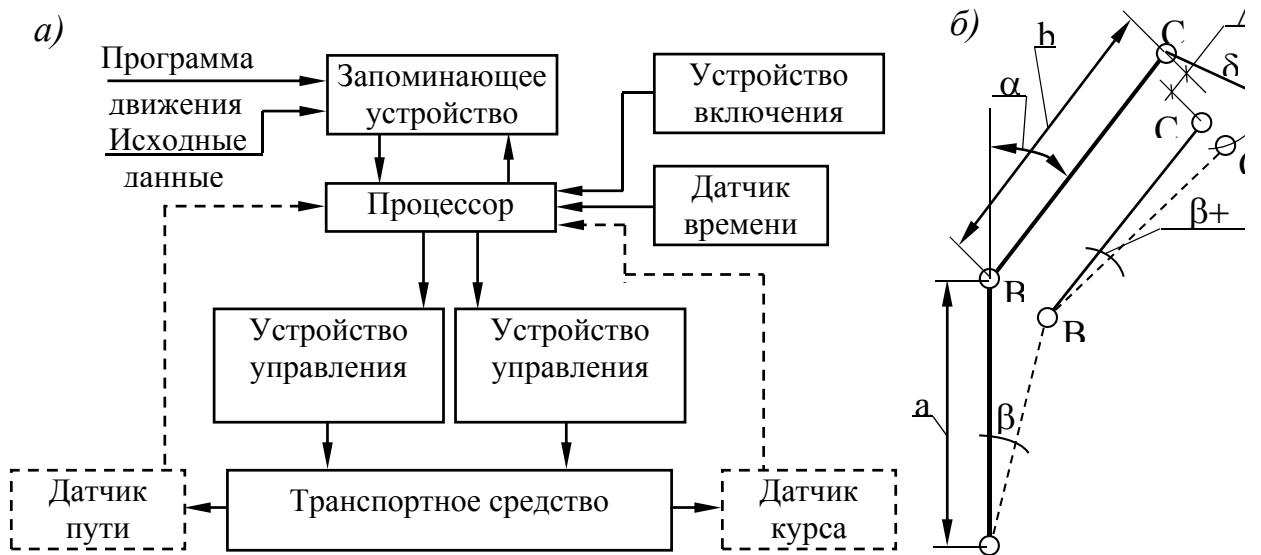


Рисунок 1.17 - Программные системы управления: а - структурная схема;  
б – планируемое и фактическое движение

Так, при ширине полосы движения 3-5 метров, ширине транспортного средства 1,5-3 м, точности начальной установки порядка 0,1-0,2 метра и времени движения 0,5-8 часов накопленная погрешность не должна превышать 0,2-2,8 м/ч, что при скорости движения порядка 10 м/с требует точности управления в пределах  $10^{-5}$  рад, что значительно меньше угловых отклонений машины, управляемой квалифицированным водителем [24].

Пониженная точность систем жесткого программного движения ограничивает их практическое применение короткими постоянными трассами или требует дополнительного ограничения отклонений.

### 1.2.4 Адаптивные системы управления

При отсутствии достаточно полных данных об условиях движения, при большой протяженности маршрутов, неточных сведениях о законах управления и параметрах управляемого объекта, разработка программы движения и управления практически невозможна. В этих случаях используют адаптивные системы управления, которые позволяют осуществлять управление движением исходя из общих целей и условий в зоне действия транспортного средства.

По содержанию задачи адаптивного управления эквивалентны задачам синтеза и реализации частных программ движения на локальном участке пути и сводятся к поиску тех решений, которые, будучи допустимыми, рациональными или оптимальными по какому-нибудь критерию в данных конкретных условиях движения, соответствуют общим целям движения.

Для решения этих задач в ходе движения необходима информация о беспилотном АТС и условиях движения. Поэтому принципиальным схемно-функциональным отличием адаптивных систем управления от программных является включение в их структуру информационно-измерительных систем, позволяющих получить информацию о состоянии, режимах работы беспилотного АТС, дорожных условиях и дорожной обстановке в объемах, достаточных для управления.

Математически задачу адаптивного управления можно сформулировать как итеративный поиск некоторой функции управления  $u(t)$  при  $t > t_0$ , удовлетворяющей условиям:

$$\begin{aligned} x_i(t) &= F[x(t); u(t); \xi] + \pi(t); \\ u(t) &\in Q_u; x(t) \in Q_x; t \in \{t_0; t_T\} \end{aligned}$$

в области значений  $Q \subset \mathbb{R}^n$ , где  $x_i$  - некоторая точка пространства состояний  $\{x_0, \dots, x_T\}$ ;  $x(t)$  - состояние управляемого объекта;  $\xi$  - вектор параметров управляемого объекта;  $\pi(t)$  – вектор внешних

кинематических, силовых и информационных воздействий;  $Qu$ ,  $Qx$ ,  $Q\pi$  - области существования переменных;  $c\pi$  - предельные значения воздействий;  $tT$ ,  $t0$ ,  $t$  – текущее, начальное и конечное время.

При этом, возможно, что применена любая из функций  $u(t)$ , удовлетворяющая приведенным условиям, или необходимо, чтобы функция управления, кроме того была оптимальна в некотором смысле, т.е. чтобы:

$$F[u_i(t)] = \text{ext}\{F[u(t)]\} \text{ или } X[x_i(t)] = \text{ext}\{X[x(t)]\},$$

где  $F$  - функционал оптимального локального управления;  $X$  - функционал конечных целей движения (терминального управления).

В случае выполнения хотя бы одного из двух последних условий можно говорить не только об адаптивном, но и об оптимально-адаптивном управлении. Следует, однако, отметить, что условия оптимальности локального и терминального управления могут не соответствовать друг другу или быть противоречивыми. Компромисс может быть достигнут при введении дополнительной компенсационной функции, позволяющей устанавливать определенные соотношения между критериями управления.

Приведенные подходы отражают схемно-функциональные и алгоритмические различия вариантов адаптивных вариантов адаптивных систем управления, для реализации которых необходимо решить проблемы создания информационно-измерительных и вычислительных систем, удовлетворяющих условиям эксплуатации автоматических транспортных средств, а также разработать соответствующее математическое обеспечение. В настоящее время эти проблемы решены в экспериментальном плане только для относительно тихоходных планетоходов и роботов.

### 1.2.5 Автономные системы управления

В различных подвижных объектах находят применение следующие автономные системы управления направлением движения: программные, программно-гироскопические, программно-астронавигационные, самонаведения, автоматического вождения по дороге, маневрирования и комбинированные. Программные, программно-гироскопические и программно-астронавигационные системы по заранее записанной в память бортовой ЭВМ программе осуществляют выработку управляющих сигналов, изменяющих по определенному закону курс движения. Такие, системы нашли широкое применение в авиации, на флоте и в специальных подвижных средствах (СПС), при испытаниях транспортных средств.

*Программные системы* являются, как правило, программно-временными, содержат жесткую или вырабатывают гибкую программу управления и не требуют бортовых измерителей. Подобные автоматические системы разомкнуты.

В *программно-гироскопических системах* с помощью бортового гироскопа измеряется курс движения транспортного средства и сравнивается с заданным программой. Управляющие сигналы вырабатываются при их отличии.

Основным элементом *программно-астронавигационной системы* являются два бортовых фотоэлектрических секстанта, устанавливаемых на стабилизированной платформе и определяющих по наблюдению за небесными светилами географические координаты управляемого объекта. Работа таких систем возможна только в условиях оптической видимости. Недостаток таких систем является их сложность, громоздкость, низкая точность определения координат, что значительно затрудняет их использование.

*Система самонаведения беспилотного АТС* обеспечивает движение на определенный ориентир. Различают три вида самонаведения: пассивное, активное, полуактивное. Системы самонаведения находят применение при управлении движением СПС, дорожно-строительных, сельскохозяйственных машин. Что определяется небольшими скоростями и расстояниями движения перечисленных транспортных средств.

*В автономных системах автоматического вождения* по дороге обеспечивается направленное движение вдоль искусственной или естественной опорной траектории. Выполняя функции, аналогичные индукционным системам автоматического вождения, эти системы не требуют токонесущего провода. В качестве измерителя расстояния или угла смещения относительно постоянной опорной траектории, тории используются оптические, телевизионные, радиолокационные или ультразвуковые устройства.

Система маневрирования позволяет изменять курс движения беспилотного АТС таким образом, чтобы обеспечивать их безопасное движение при наличии препятствий или других движущихся автоматических транспортных средств.

*В комбинированных системах* последовательно или параллельно используются различные методы управления направлением движения.

Однако, расширение сферы применения автоматизированных транспортных средств требует управления не только направлением, но и скоростью движения транспортного средства.

*Замкнутые программные системы управления движением.* Программные системы управления используются для управления как отдельными автоматическими транспортными средствами, так и могут входить в состав АСУ.

Данные системы управления для определения пройденного пути могут использоваться механические, доплеровские и инерциальные устройства. Идея работы доплеровского измерителя пройденного пути заключается в

непрерывном измерении поступательной скорости и интегрирования ее. Однако при систематической относительной ошибке измерения скорости  $\sigma_{vr}/v_r=0,005$ ,  $t=30$  мин и  $V_r = 20$  м/с местоположение определяется с систематической ошибкой, равной 180 м [24].

Уменьшение ошибки достигается использованием двухлучевой системы, которая имеет систематическую ошибку на порядок меньше чем однолучевая система.

Принцип действия инерциальной системы состоит в измерении ускорения  $a(t)$  и преобразования его в скорость и пройденный путь. Инерциальные акселераторы обычно обладают невысокой точностью и используются для грубого определения пройденного пути и скорости. На основании сравнения измеренного пройденного пути и скорости с заданными программой вырабатываются управляющие сигналы на изменение скорости движения.

Использование данных о пройденном пути, скорости движения и угле отклонения оси движения позволяет производить сравнение заданного и вычисленного положения транспортного средства в прямоугольной системе координат.

*Системы самонаведения беспилотного АТС.* Самонаведением называется такой способ управления курсом движения, когда управляющий сигнал вырабатывается на основе информации о смещении беспилотного АТС относительно направления на ориентир. Эта информация содержится в излученном или отраженном от ориентира сигнале, поступающем на вход бортового приемника. Различают активные и пассивные системы самонаведения. Достоинством пассивных систем самонаведения, принимающих инфракрасное излучение ориентира (объекта), является простота аппаратуры, состоящей из приемной антенны, приемника, управляющего и усилительно-приводного устройств; недостатком – значительная зависимость дальности действия от типа объекта,

метеорологических условий, времени суток. Однако, точность как пассивных, так и активных систем самонаведения зависит от флуктуации амплитуды принимаемого сигнала, возникающей вследствие тряски транспортного средства изменения атмосферных условий (амплитудный шум), от случайных смещений центра отражения (излучения), вызывающих изменение направления прихода сигналов (угловой шум), внутренних шумов приемника и т. д. Значительное влияние на точность самонаведения беспилотного АТС оказывает отражение сигналов от земли. Переотражение от земли вызывает уход направления приема сигнала, с вследствие экранирующего воздействия рельефа местности возникают пропадания сигналов.

Наряду с перечисленными причинами возникновения ошибок наведения вследствие люфтов, дрейфа нуля, неточности сопряжения элементов и т.д.

*Системы автоматического вождения по дороге (САВ).* Весь комплекс САВ можно отнести к двум большим классам.

*В системе с оптическими измерителями* используют либо предварительно нанесенную на полотно дороги белую линию, либо границу между дорогой и обочиной. Расположенные на беспилотном АТС и направленные на участки дороги, отстоящие от беспилотного АТС на 20 - 40 м, оптические измерители-фотоприемники принимают отраженный от дороги естественный или искусственный свет. Суть методики заключается в воздействии на рулевое управление при рассогласовании направления движения транспортного средства с заданным.

*В акустических САВ* в качестве опорной траектории используется барьер, устанавливаемый вдоль границы дорожного полотна. Акустический дальномер, установленный на беспилотном АТС, определяет расстояние до барьера и сравнивает его с заданным. При обнаружении рассогласования дальностей, вырабатывается управляющий сигнал, поступающий в усилительно-приводное устройство рулевого управления.

Недостатком акустической системы САВ является необходимость установки вдоль всей трассы движения акустического отражателя - барьера,

достоинством - возможность при простой схеме измерителя измерять весьма малые расстояния (до долей метра).

Общим недостатком всех описанных САВ является трудность организации многорядного движения, влияние на работу системы других движущихся и стоящих объектов вблизи расположенных местных предметов, кюветов и т.д., необходимость специальной подготовки дорог, обочин и т.д.

*Радиолокационная система маневрирования.* Радиолокационная система маневрирования может дополнять программную или иную систему управления движения с целью автоматического обеспечения безопасности движения по бездорожью. Подобная система может работать в автоматическом или полуавтоматическом режиме. В первом случае она обеспечивает автоматическое изменение курса или скорости движения при угрозе столкновения с другими ТС или местными предметами. Во втором — информация о необходимом маневре в том или ином виде доводится до водителя. Однако и для этих систем проблемой является обнаружение ям и кюветов опасных для беспилотного АТС. Для решения этой задачи можно использовать отдельный измеритель. В тоже время, создание измерителя, отвечающего всем необходимым требованиям, довольно трудоемко. Применение радиолокации, все же, значительно повышает безопасность движения.

### **1.2.7 Автономные системы управления скоростью движения**

Задача управления скоростью является одной из важных задач при автоматизации движения беспилотного АТС. Скорость движения определяет время затрачиваемое на решение транспортных задач, производительность и экономичность беспилотного АТС. Скоростные режимы и частота их изменения влияют на управляемость и безопасность движения, условия, ресурс и надежность работы узлов и агрегатов беспилотного АТС, число и содержание операций, необходимых для управления. Все автоматические

системы управления скоростью можно разделить на системы ее стабилизации и системы оптимального управления скоростью.

*Системы, стабилизирующие скорость движения.* В процессе движения беспилотного АТС скорость многократно изменяется. Это происходит вследствие возмущений, вызванных изменением условий движения, управления или отклонения режимов работы узлов шасси беспилотного АТС от заданных водителем или автоматической системой. Между тем для ряда частных режимов движения желательно, чтобы скорость машины изменялась по заранее заданному закону, или была постоянной, равной какой-нибудь определенной скорости, например плановой. Такая постановка задачи в теории автоматического управления соответствует задачам стабилизации (или регулирования) значений управляемой величины (рис. 1.18), т. е. целью управления является [24]:

$$V_n + \Delta \geq V_i \geq V_n - \Delta,$$

где  $V_i$  - скорость движения беспилотного АТС;  $V_n$  - заданная (планируемая) скорость движения, которая может быть постоянной или изменяться по пути и времени в пределах  $V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max}$ ;  $\Delta$  - планируемое отклонение.

На практике при создании систем, стабилизирующих скорость движения, встает вопрос оптимизации работы моторно-трансмиссионных систем, то есть выбора режима работы двигателя, тормозов и трансмиссии, в совокупности обеспечивающих заданную скорость. Наилучшим решением здесь была бы работа двигателя на постоянных, фиксированных режимах (например, максимальной мощности или минимального расхода топлива) и плавное, бесступенчатое регулирование скорости движения беспилотного АТС. Это можно было бы получить при использовании фрикционных вариаторов, а также гидромеханических, гидрообъемных и электрических трансмиссий. Однако экономические и производственные ограничения, а также ряд нерешенных научно-технических проблем пока препятствуют

широкому распространению подобных трансмиссий на беспилотных АТС [24].

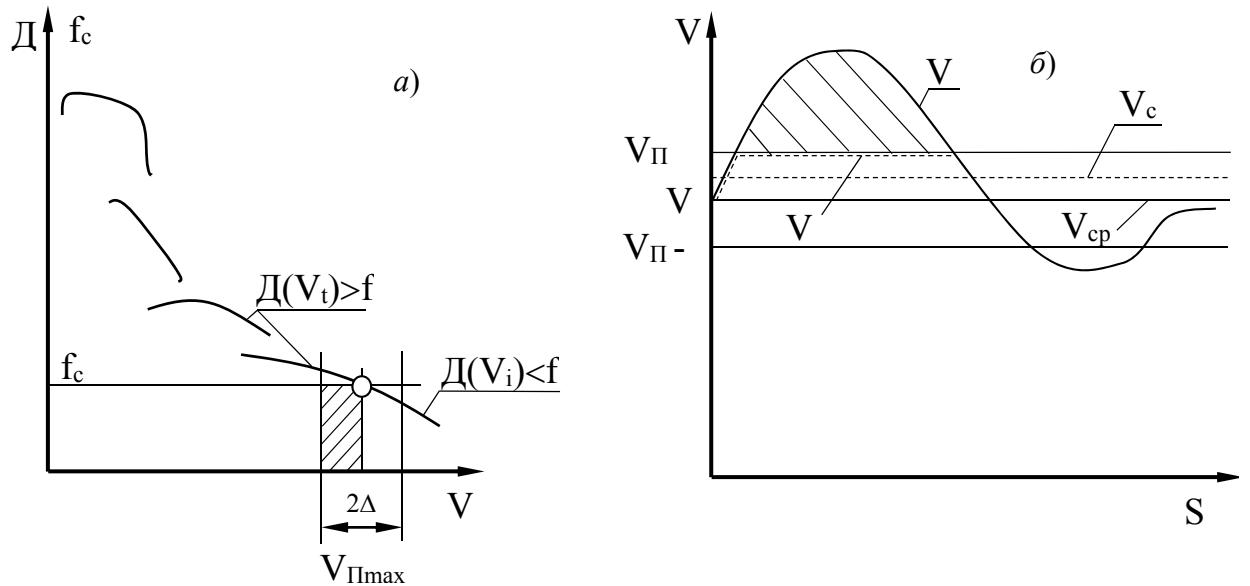


Рисунок 1.18 - Схема работы системы, стабилизирующей скорость движения: *а* – область возможной стабилизации скорости движения; *б* – влияние стабилизации на скорость движения беспилотного АТС ( $V_1$  – без стабилизации;  $V_2$  – при использовании системы стабилизации)

При оптимизации управления скоростью движения можно стремиться к достижениям различных целей. Соответственно разными будут критерии оптимальности, принципы работы и средства реализации систем управления. Поэтому, говоря о системах оптимального управления, будем иметь в виду системы, которые в ходе управления скоростью обеспечивают выполнение каких-либо условий, определяющих качество и (или) эффективность управления (рис. 1.19). Для оптимизации управления скоростью наиболее часто используются критерии минимума эксплуатационных затрат (расход топлива, износ) или минимума времени движения для достижения пункта назначения (критерий быстродействия), а также комбинированные критерии типа стоимость - эффективность (производительность на рубль затрат, скорость на расход топлива и т. д.).

Выбор планируемых значений скорости движения беспилотного АТС на участках трасс и режимов работы узлов шасси для обеспечения

запланированных скоростей движения может производиться с использованием различных критериев. А именно:

- критерий минимума эксплуатационных затрат;
- критерий быстродействия.

Вместе с тем, могут существовать и другие критерии, определяющие логику управления промежуточного типа или управления беспилотным АТС в частных случаях движения.

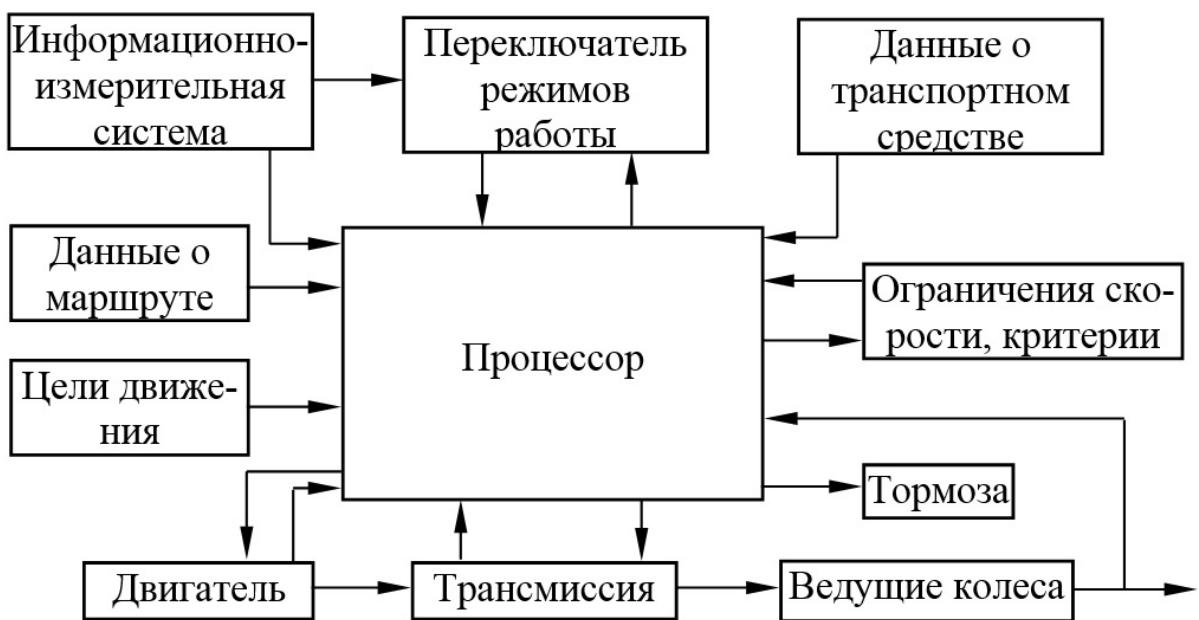


Рисунок 1.19 - Функциональная схема многорежимной системы оптимального управления скоростью движения беспилотного АТС

Таким образом, проведенный анализ систем управления беспилотных АТС выявил большое число проблем, встающих перед конструкторами в процессе разработки беспилотного АТС и определения управляющей системы. Анализ систем управления выявил несколько общих проблем автоматизации управления. К ним относятся высокая погрешность управления направлением и скоростью движения, невозможность большинства систем учитывать сложность внешних условий движения, управление только движение по заданной траектории с использованием внешних источников определяющих положение беспилотного АТС в пространстве. Тем актуальнее

является задача прогнозирования характеристик криволинейного движения беспилотного АТС с помощью имитационного математического моделирования системы управления движением, с учетом временных задержек измерительных, вычислительных и исполнительных устройств.

### **1.3 Анализ условий эксплуатации**

Функциональное назначение конкретного типа беспилотного АТС позволяет провести анализ условий его эксплуатации. Ввиду того, что объектом дальнейшего исследования является беспилотное АТС на базе серийно выпускаемого автомобиля «LADA-Калина», рассмотрим условия эксплуатации серийно выпускаемых легковых автомобилей.

Согласно руководству по эксплуатации серийно выпускаемого автомобиля «LADA-Калина», автомобиль предназначен для перевозки людей и багажа по дорогам общего пользования с твердым покрытием, отвечающим требованиям ГОСТ Р 50597.

Автомобильные дороги, дороги и улицы городов и других населенных пунктов по их транспортно-эксплуатационным характеристикам объединены в три группы:

группа А - автомобильные дороги с интенсивностью движения более 3000 авт/сут; в городах и населенных пунктах - магистральные дороги скоростного движения, магистральные улицы общегородского значения непрерывного движения;

группа Б - автомобильные дороги с интенсивностью движения от 1000 до 3000 авт/сут; в городах и населенных пунктах - магистральные дороги регулируемого движения, магистральные улицы общегородского значения регулируемого движения и районного значения;

группа В - автомобильные дороги с интенсивностью движения менее 1000 авт/сут; в городах и населенных пунктах - улицы и дороги местного

значения; категории улиц и дорог в городах и населенных пунктах - по СНиП 2-07.01. Установленные стандартом требования должны обеспечиваться организациями, в ведении которых находятся автомобильные дороги, а также улицы и дороги городов и других населенных пунктов [26].

В случае, когда эксплуатационное состояние дорог и улиц не отвечает требованиям настоящего стандарта, на них должны быть введены временные ограничения, обеспечивающие безопасность движения, вплоть до полного запрещения движения.

Проезжая часть дорог и улиц, покрытия тротуаров, пешеходных и велосипедных дорожек, посадочных площадок, остановочных пунктов, а также поверхность разделительных полос, обочин и откосов земляного полотна должны быть чистыми, без посторонних предметов, не имеющих отношения к их устройству.

Покрытие проезжей части не должно иметь просадок, выбоин, иных повреждений, затрудняющих движение транспортных средств с разрешенной правилами, дорожного движения скоростью.

Предельные размеры отдельных просадок, выбоин и т.п. не должны превышать по длине 15 см, ширине - 60 см и глубине - 5 см.

Ровность покрытия проезжей части должна соответствовать требованиям, приведенным в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Ровность покрытия проезжей части

Группа дорог и улиц по их транспортно-эксплуатационным характеристикам	Состояние покрытия по ровности	
	Показатель ровности по прибору ПКРС-2, см/км, не более	Число просветов под 3-метровой рейкой, %, не более
A	660	7
Б	860	9
В	1200	14

Коэффициент сцепления покрытия должен обеспечивать безопасные условия движения с разрешенной Правилами дорожного движения скоростью и быть не менее 0,3 при его измерении шиной без рисунка протектора и 0,4 - шиной, имеющей рисунок [26].

Автомобильные дороги, а также улицы и дороги городов и других населенных пунктов должны быть оборудованы дорожными знаками, изготовленными по ГОСТ 10807 и размещенными по ГОСТ 23457 в соответствии с утвержденной в установленном порядке дислокацией.

Разметка автомобильных дорог, а также улиц и дорог городов и других населенных пунктов должна соответствовать ГОСТ 13508.

#### **1.4 Цель и задачи исследования**

Анализ результатов исследований, проведенных в первой главе, позволяет сделать следующие выводы:

1. Подтверждена актуальность применения беспилотных АТС в различных отраслях экономики, а также для повышения обороноспособности страны и обеспечения ее внутренней безопасности.

2. Анализ систем управления беспилотных АТС выявил несколько основных проблем, возникающих перед разработчиками при их проектировании и создании. К основным из них следует отнести высокую погрешность при формировании управляющих воздействий на транспортное средство, невозможность эффективно учесть быстро меняющиеся при движении внешние условия, возможность обеспечения движения беспилотных АТС по заданной траектории только на основе информации, поступающей от внешних источников, определяющих положение беспилотных АТС в пространстве.

3. На основе проведенного анализа условий эксплуатации беспилотных автотранспортных средств возможно провести формирование исходных данных для прогнозирования характеристик криволинейного движения на основе имитационного математического моделирования на ЭВМ с учетом особенностей внешней среды.

Целью работы является обеспечение безопасности движения беспилотных АТС в заданной внешней среде за счет выбора рациональных параметров систем управления движением на стадии проектирования.

Для достижения цели работы обоснована необходимость решения следующих научных задач:

- разработки математической модели динамики беспилотного АТС с учетом особенностей функционирования систем управления движением;
- разработки метода выбора рациональных параметров систем управления движением беспилотных АТС на стадии проектирования;
- проведения экспериментальных исследований движения беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Калина» с целью оценки адекватности и точности разрабатываемой математической модели;
- проведения теоретических исследований динамики беспилотного АТС на совокупности дорожных условий при выполнении типовых маневров при различных параметрах систем управления движением;
- на основе разработанного метода обосновать выбор технических решений для реализации систем управления беспилотным АТС на базе «LADA-Калина».

## ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

### **2.1 Требования к математической модели движения беспилотного АТС**

Требования к математической модели динамики беспилотного АТС определяются совокупностью задач, при решении которых должна быть получена необходимая информация для оценки эксплуатационных качеств. К числу основных можно отнести следующие требования:

- модель должна описывать совместную динамику кузова и ходовой части беспилотного АТС при прямолинейном и криволинейном движении с точностью, необходимой для оценки параметров движения;
- в модели должны быть учтены особенности систем управления движением и движителя, неудерживающий и неголономный характер связей, наложенных на беспилотное АТС;
- в модели не должно накладываться ограничений на характеристики профиля трасс в вертикальной плоскости, что позволит исследовать поведение машины при движении по дорогам;
- движение беспилотного АТС должно моделироваться с учетом характеристик взаимодействия движителя с опорным основанием, так как тягово-цепные свойства влияют на устойчивость и управляемость машины.

Вид уравнений динамики и способы их исследования определяют адекватность моделируемых процессов реальным.

В настоящее время наибольшее распространение получили численные методы моделирования на ЭВМ. Это дает возможность исследовать дифференциальные уравнения движения беспилотного АТС, полученные при

минимальном количестве необходимых допущений, аналитическое решение для которых найти практически невозможно.

В общем случае дифференциальные уравнения движения, которые позволяют с требуемой для практических целей точностью количественно описать процесс динамики движения беспилотного АТС, носят явно выраженный нелинейный характер. Это обстоятельство не позволяет использовать эффективные методы статистической динамики при моделировании. В этой связи возникает потребность накапливать статистику, моделируя поведение машины в различных условиях эксплуатации и режимах движения в ходе многочисленных детерминистических вычислительных экспериментов на ЭВМ. Полученную в результате расчетов обширную информацию о динамических процессах беспилотного АТС в числовом виде, далее необходимо статистически систематизировать для обобщения результатов теоретического исследования и практических рекомендаций.

Процесс численного детерминированного моделирования на ЭВМ можно представить в виде следующего пошагового алгоритма.

Пусть в момент времени  $t_i$  известны векторы перемещения  $x_i$  и скорости  $\dot{x}_i$  системы (начальные условия шага моделирования) в проекциях на обобщенные координаты (рис. 2.1). Следовательно, в этот момент могут быть определены текущие силовые факторы, действующие на беспилотное АТС.

Далее по уравнениям динамики определяются временные производные высших порядков по обобщенным координатам. Значения производных используются в численном методе и служат для определения (прогнозирования) положения и скорости системы в момент  $t_{i+1} = t_i + h$ , где  $h$  - шаг прогноза. Полученные значения  $x_{i+1}$ ,  $\dot{x}_{i+1}$  являются начальными условиями на  $i+1$  шаге.

Таким образом, подготовка вычислительного эксперимента, каковым и является моделирование движения беспилотного АТС, содержит три основных

этапа: составление дифференциальных уравнений, выбор численного метода и программная реализация.

При выводе дифференциальных уравнений прямолинейного и криволинейного движения беспилотного АТС особое место занимает обоснованное принятие допущений. Допущения должны с одной стороны обеспечить выполнение требований, предъявляемых к математической модели, а с другой – ограничить число моделируемых параметров системы самыми необходимыми.

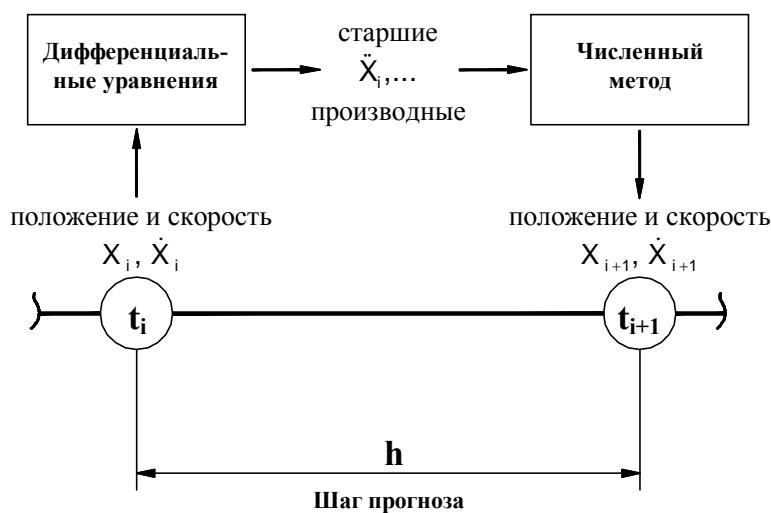


Рисунок 2.1 - Схема алгоритма численного моделирования

В соответствии с требованиями к математической модели примем следующие допущения:

- вращающиеся массы силовой установки и трансмиссии приведены к ведущим колесам;
- опорное основание полагается недеформируемым (необходимая податливость по нормали к опорному основанию, может быть учтена в соответствующих характеристиках шин колес, а тангенциальная податливость опорного основания учитывается в характеристике его сцепных свойств);
- профиль опорного основания полагаем кусочно-линейным.

## **2.2 Математическая модель динамики беспилотного АТС на базе автомобиля «LADA-Калина»**

### **2.2.1 Математическая модель криволинейного движения беспилотного АТС**

Для оценки тягово-динамических и тормозных качеств, устойчивости, управляемости и маневренности беспилотного АТС, для исследования эффективности различных законов и алгоритмов для рулевого управления, для систем активной безопасности, для отработки законов управления трансмиссией беспилотного АТС при различных условиях движения (движение на разных типах опорного основания, в том числе и на «миксте», движение в подъем, криволинейное движение и т.д.), для оценки потребных энергетических затрат энергии на движение при разгоне и торможении беспилотного АТС, а также для решения ряда других сопутствующих задач разработана математическая модель движения беспилотного АТС на базе автомобиля «LADA-Калина».

### **2.2.2 Общие уравнения динамики беспилотного АТС**

Движение беспилотного АТС, как твердого тела, рассматривается в горизонтальной плоскости на ровной недеформируемой опорной поверхности и складывается из поступательного движения центра масс и вращательного движения вокруг центра масс (рис. 2.2). Система уравнений (2.1), описывающая данное движение, позволяет рассчитать текущие ускорения по значениям сил и моментов, действующих на беспилотное АТС.

Для описания данного случая движения беспилотного АТС вводятся следующие системы координат: неподвижная система координат  $x'-y'$ ,

подвижная система координат  $x-y$ , связанная с корпусом беспилотного АТС, и система координат  $x''-y''$ , связанная с  $i$ -ым колесом.

Начало координат  $x-y$  связано с центром масс беспилотного АТС, ось  $x$  направлена вдоль продольной оси беспилотного АТС, ось  $y$  – вдоль поперечной. Начало координат  $x''-y''$  связано с проекцией центра  $i$ -того колеса на плоскость опорного основания, ось  $x''$  направлена вдоль проекции продольной плоскости колеса на опорное основание,  $y''$  – вдоль проекции оси вращения колеса.

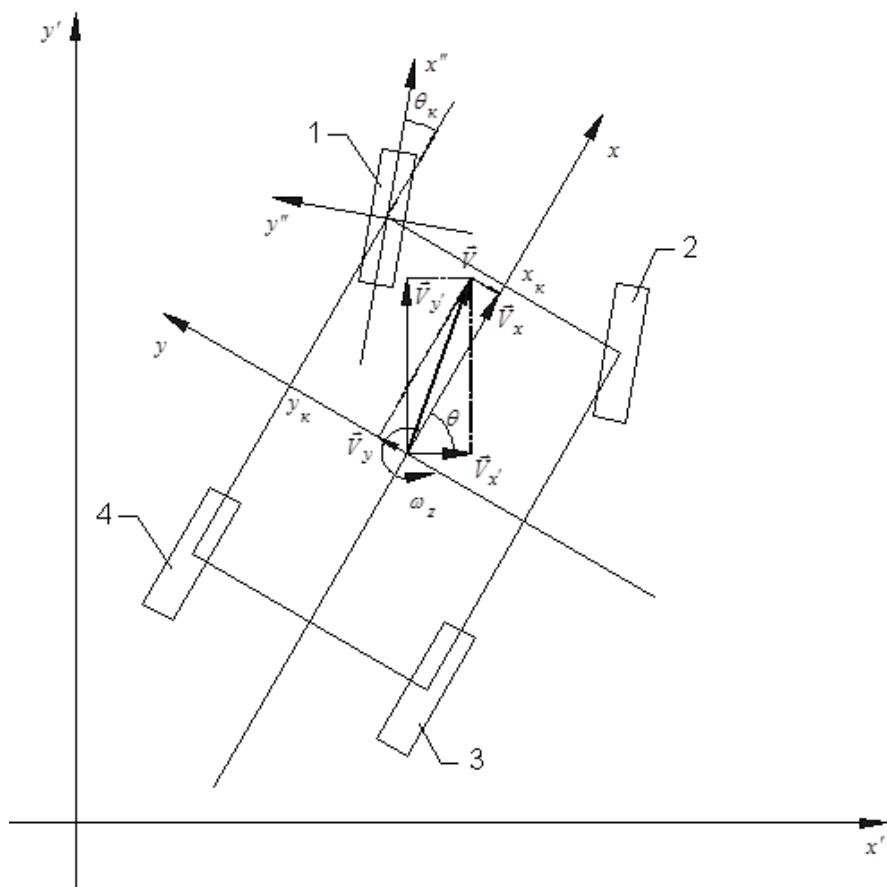


Рисунок 2.2 - Расчетная схема движения беспилотного АТС

Расположение осей по базе беспилотного АТС определяется координатами колес ( $x_i$ ), которые являются исходными задаваемыми параметрами. В этой связи математическая модель при необходимости

изменения межосевых расстояний может быть достаточно просто трансформирована в соответствии с геометрическими параметрами.

$$\begin{cases} a_x = \frac{dV_x}{dt} - \omega_z \cdot V_y = \frac{1}{m} \cdot \left( \sum_{i=1}^4 R_{xi} - m \cdot g \cdot \sin(\alpha) - P_{wx} \right); \\ a_y = \frac{dV_y}{dt} + \omega_z \cdot V_x = \frac{1}{m} \cdot \left( \sum_{i=1}^4 R_{yi} - P_{wy} \right); \\ J_z \cdot \frac{d\omega_z}{dt} = \sum_{i=1}^4 M_{nki} + \sum_{i=1}^4 M(\vec{R}_i); \\ V_{x'} = \frac{dx'}{dt} = V_x \cdot \cos \theta - V_y \cdot \sin \theta; \\ V_{y'} = \frac{dy'}{dt} = V_x \cdot \sin \theta + V_y \cdot \cos \theta; \\ \omega_z = \frac{d\theta}{dt}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $m$  – масса беспилотного АТС;  $J_z$  – момент инерции беспилотного АТС относительно оси  $z$ ;  $\vec{V}$  – вектор скорости центра масс беспилотного АТС;  $\vec{a}$  – вектор ускорения центра масс беспилотного АТС (абсолютная производная от вектора скорости центра масс беспилотного АТС);  $\frac{d\vec{V}}{dt}$  – относительная производная от вектора скорости центра масс беспилотного АТС;  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости поворота беспилотного АТС;  $\theta$  – угол поворота беспилотного АТС относительно оси  $x'$ ;  $x'$ ,  $y'$  – координаты центра масс беспилотного АТС в неподвижной системе координат;  $x-y$  – подвижная система координат, связанная с беспилотным АТС;  $\vec{R}_i$  – вектор силы взаимодействия с грунтом, действующей на  $i$ -ое колесо;  $\vec{P}_w$  – вектор силы сопротивления воздуха;  $M_{nki}$  – момент сопротивления повороту  $i$ -го колеса;  $\alpha$  – угол преодолеваемого подъема.

### Определение силы сопротивления воздуха

Силу сопротивления воздуха принято оценивать сосредоточенной силой, являющейся равнодействующей всех составляющих сопротивления воздуха, приложенной в точке, называемой центром парусности  $H_w$ .

Вектор силы сопротивления воздуха  $\vec{P}_w$  направлен противоположно вектору скорости центра масс беспилотного АТС  $\vec{V}_c$ . Величина силы сопротивления воздуха зависит от аэродинамических свойств беспилотного АТС, величины скорости центра масс беспилотного АТС, свойств воздушной среды и определяется по формулам [27, 28]:

$$P_{w_x} = c_x \cdot \frac{p_w}{2} F_{lob} \cdot V_{c_x}^2 , \quad (2.2)$$

где  $c_x$  – коэффициент обтекаемости беспилотного АТС в продольной плоскости,  $F_{lob}$  – площадь лобового сечения беспилотного АТС;  $p_w$  – плотность воздуха.

$$P_{w_y} = c_y \cdot \frac{p_w}{2} \cdot F_{bok} \cdot V_{c_y}^2 , \quad (2.3)$$

где  $c_y$  – коэффициент обтекаемости беспилотного АТС в поперечной плоскости,  $F_{bok}$  – площадь бокового сечения беспилотного АТС.

Приближённо площадь лобового сечения определяется:

$$F_{lob} = \kappa_{lob} \cdot B \cdot H , \quad (2.4)$$

где  $\kappa_{lob}$  – коэффициент формы лобовой площади.

### 2.2.3 Математическая модель для определения нормальных реакций

Нормальные реакции колёс перераспределяются вследствие действия силы сопротивления воздуха, моментов сопротивления качению колёс, ускорения центра масс и силы тяжести для случая преодоления подъёма.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 R_z = m \cdot g \cdot \cos \alpha, \\ \sum_{i=1}^4 R_z \cdot x_i + \sum_{i=1}^4 M_{f_i} + P_{w_x} \cdot H_{w_x} = -m \cdot H_z \cdot (g \cdot \sin \alpha + a_x); \\ \sum_{i=1}^4 R_z \cdot y_i + P_{w_y} \cdot H_{w_y} = -m \cdot a_y \cdot H_z, \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты  $i$ -го колеса в подвижной системе координат  $x-y$ ;  $H_z$  – высота центра масс беспилотного АТС;  $H_{w_x}, H_{w_y}$  – высоты точки приложения сил воздушного сопротивления в лобовой и боковой проекциях беспилотного АТС, соответственно.

Предположив, что подвеска каждого колеса эквивалентна идеальной линейной пружине с жесткостью  $k$ , несопротивляющейся поперечно, и пренебрегая динамикой колебаний корпуса, можно составить следующие соотношения для совместных деформаций упругих элементов:

$$\begin{cases} \frac{R_{z1}}{k} = z + x_1 \cdot \operatorname{tg} \phi + y_1 \cdot \operatorname{tg} \psi; \\ \dots \\ \frac{R_{z4}}{k} = z + x_4 \cdot \operatorname{tg} \phi + y_4 \cdot \operatorname{tg} \psi. \end{cases} \quad (2.6)$$

Обозначим  $A = k \cdot \operatorname{tg} \phi$ ,  $B = k \cdot \operatorname{tg} \psi$ ,  $D = k \cdot z$ . Тогда систему уравнений для совместных деформаций можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{cases} A \cdot x_1 + B \cdot y_1 - R_{z1} + D = 0; \\ \dots \\ A \cdot x_4 + B \cdot y_4 - R_{z4} + D = 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

Итак, мы получили четыре уравнения одной и той же плоскости. Из этого следует, что концы векторов нормальных реакций лежат в одной плоскости. Таким образом, система уравнений (2.5) может быть дополнена уравнением:

$$R_{z1} - R_{z2} + R_{z3} - R_{z4} = 0 \quad (2.8)$$

Совместное решение систем (2.5) и (2.7) (или решение системы (2.5), дополненной (2.8)) позволяет определить значения нормальной реакции опорного основания под каждым колесом на каждом шаге моделирования. При этом значения ускорений используют с предыдущего шага моделирования.

Известно, что связь колеса с опорным основанием не является удерживающей, поэтому решения, содержащие отрицательные значения нормальных реакций опорного основания, лишены физического смысла. Если одна (или несколько) из нормальных реакций получается отрицательной, то эта реакция (реакции) принимается равной нулю и система решается повторно (соответственно число уравнений уменьшается). Если при решении системы получаем несколько отрицательных значений  $R_{zi}$  (два и более), тогда останавливаем процесс численного моделирования, так как этот случай соответствует опрокидыванию беспилотного АТС.

## 2.2.4 Математическое моделирование взаимодействия движителя с недеформируемым опорным основанием

Под математической моделью взаимодействия колеса с опорной поверхностью понимается некоторая совокупность зависимостей (алгебраических или дифференциальных), позволяющая связать силовые параметры взаимодействия колеса с опорной поверхностью (продольная сила, поперечная сила и т.д.) с кинематическими параметрами, которые полагаются известными. В качестве входных переменных в моделях используются различные показатели, такие как скорость центра масс машины, теоретическая скорость нижней части шины относительно корпуса машины и другие. При численном решении уравнений движения, математическая модель движителя позволяет вычислить значения производных от координат системы, известных на текущем шаге численного интегрирования, и определить состояние системы в следующий момент времени. Любую модель колеса можно представить в виде:

$$\begin{aligned} R_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3 \dots) \\ &\dots \\ R_i &= f_i(x_1, x_2, x_3 \dots), \end{aligned}$$

где  $R_i$  - силовой параметр взаимодействия;  $x_i$  - кинематический параметр взаимодействия, известный в данный момент.

Вид функции  $f_i$  и состав параметров  $x_i$  определяется из физических представлений о контакте колеса с поверхностью.

Качение эластичного колеса изучалось в двух направлениях. Одно из них – изучение динамики и кинематики неголономных систем с классическими неголономными связями. Известно несколько подходов к теоретическому представлению качения пневматического колеса,

отличающихся степенью учета особенностей процесса увода [29]. Это теории И. Рокара, И. Грейдануса, М. В. Келдыша, А. А. Хачатурова.

Другое направление опирается в основном на результаты экспериментов и эмпирические зависимости. При этом исследовались отношения между силовыми и кинематическими характеристиками колеса при определенных режимах качения. К такому направлению можно отнести модели, построенные на теории бокового увода (классический подход), модели, построенные на описании взаимодействия колеса с опорной поверхностью с прямоугольным отпечатком в пятне контакта, модели с «натянутой нитью» и «упругим кольцом».

Основы классического подхода изложены в работах Е. А. Чудакова, Я. М. Певзнера, которые в настоящий момент подробно описан во многих источниках, например в [30]. Классический подход нашел широкое применение при исследованиях устойчивости колесных и гусеничных машин [29, 31, 32].

В соответствии с классическим подходом вводится фиктивная величина называемая радиусом качения и определяемая по соотношению:

$$r_k = \frac{V_\sigma}{\sigma \cdot \omega_k},$$

где  $V_\sigma$  - скорость проскальзывания колеса по основанию

$\omega_k$  - угловая скорость колеса

$\sigma$  - коэффициент юза (буксования) определяемый по соотношению:

$$\sigma = \frac{V_{nep} - V_{omn}}{V_{omn}},$$

где  $V_{nep}$  - переносная скорость колеса вдоль его серединной плоскости,  $V_{omn}$  - скорость нижней точки колеса относительно корпуса машины.

Далее продольная сила определяется по эмпирической зависимости, условно изображенной на рис 2.3:

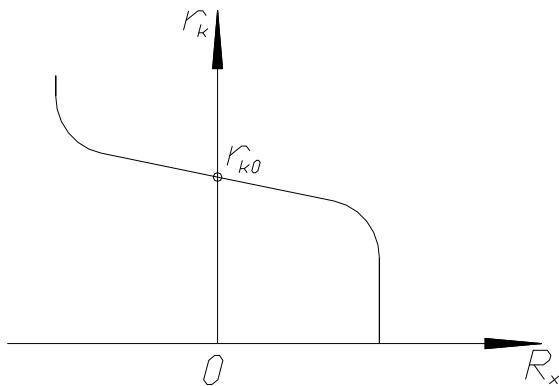


Рисунок 2.3 - Зависимость силы от радиуса качения колеса

При небольших продольных силах зависимость можно считать приблизительно линейной и записать:

$$K_x R_x = r_{k0} - r_k,$$

где  $K_x$  - коэффициент тангенциальной эластичности.

Формирование боковой реакции при уводе рассматривается как независимый процесс. При малых углах увода можно записать:

$$R_y = K_y \delta,$$

где  $K_y$  - коэффициент сопротивления боковому уводу;  $\delta$  - угол увода.

Коэффициент  $K_x$  рассматривается как характеристика шины. Однако  $K_x$  может сильно изменяться в зависимости от давления воздуха вшине, степени износа протектора.

Коэффициент  $K_y$  сильно зависит от нормальной нагрузки на колесо и многих других факторов, что сильно уменьшает точность описания

взаимодействия колеса с опорной поверхностью при больших углах увода и колебаниях нормальной нагрузки на колесо, угла развала колес.

В работе [32] предлагается обобщение классического подхода на случай нестационарного увода. В таком случае боковая реакция колеса определяется выражением

$$R_y = C(\delta - B\dot{\delta}),$$

где коэффициент  $C$  определяет реакцию колеса на установившийся увод, а коэффициент  $B$  вносит динамическую поправку. Однако зависимость коэффициента  $B$  от эксплуатационных и конструктивных факторов мало изучена.

Основное преимущество классического подхода – возможность линеаризации при малых углах увода. Часто при исследованиях устойчивости достаточно ограничиться исследованием линейной системы. Однако при исследовании поведения машины во время экстренного торможения или при бортовом повороте, когда работает СДС, применение линейной классической теории может дать принципиально неверные результаты.

Модели с «прямоугольным отпечатком» описаны в работах [33, 34, 35]. В таких моделях для вывода расчетных зависимостей используется представление о прямоугольной площадке контакта постоянной длины, которая не искажается при боковом уводе (см. рис. 2.4).

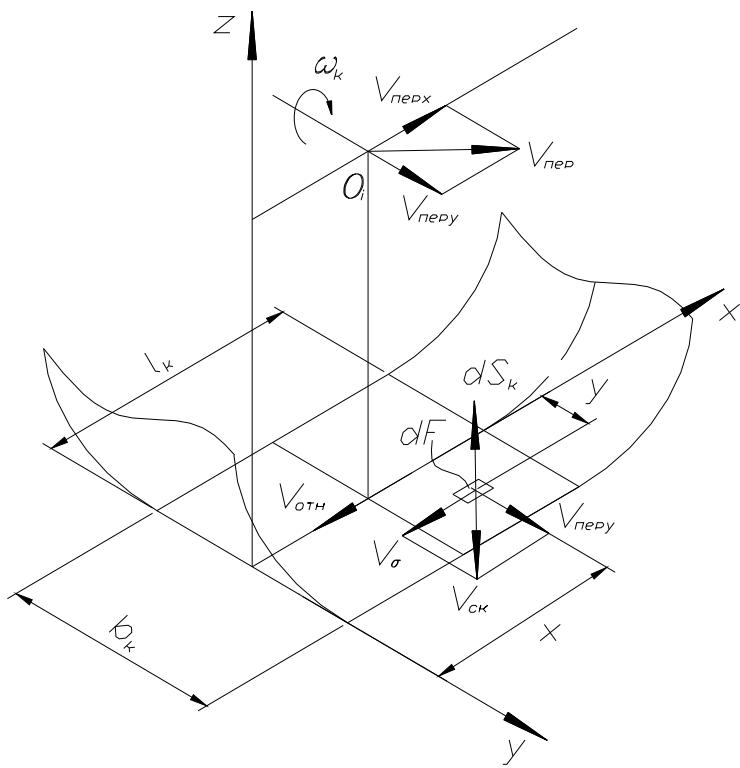


Рисунок 2.4 - Расчетная схема модели «с прямоугольным отпечатком»

При этом точка шинного обвода, двигаясь по контактному отпечатку, деформирует протектор и опорную поверхность. Авторы применяют либо экспоненциальную зависимость напряжений сдвига от перемещения [35], изображенную на рис.2.5., либо идеальную упруго-пластичную [34] (рис. 2.6.).

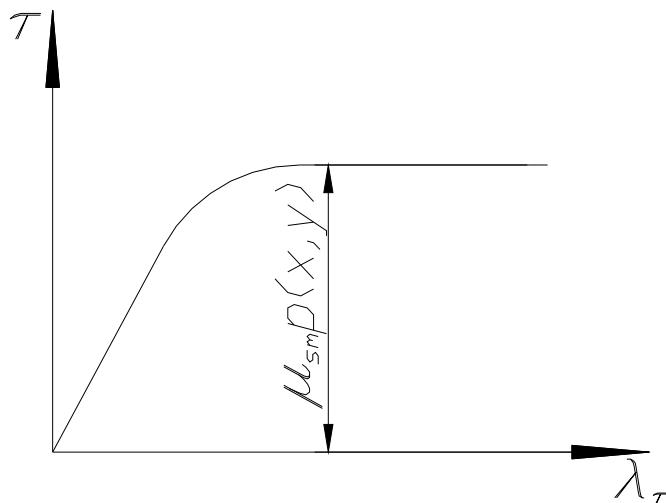


Рисунок 2.5 - Экспоненциальная зависимость напряжений от сдвига

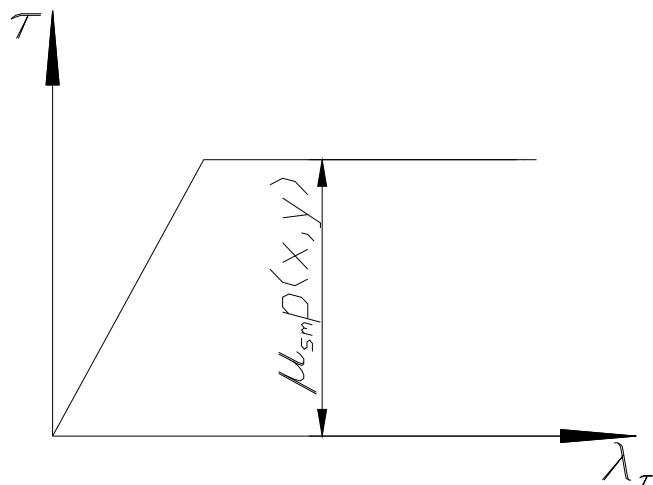


Рисунок 2.6 - Упругопластичная зависимость напряжений от сдвига

Распределение нормальных давлений, как правило, предполагается равномерным по ширине и эллиптическим по длине контактной площадки.

При любом режиме качения колеса в передней части отпечатка присутствует зона чистого качения, а в задней части присутствует зона скольжения. То есть вводится понятие частичного скольжения колеса.

В качестве характеристики скольжения вместо радиуса качения применяется коэффициент скольжения, определяемый по зависимости:

$$S = \left| \frac{V_{ck}}{V_{omn}} \right|.$$

Коэффициент скольжения является обобщением понятия коэффициента юза-буксования.

В результате, в общем виде получается следующая зависимость силы от коэффициента скольжения (рис.2.7.), которая вполне согласуется с экспериментальными данными. Величина критического скольжения ( $S_{kp}$ ), коэффициента взаимодействия при критическом скольжении ( $\mu_{S_{kp}}$ ), коэффициента взаимодействия при полном скольжении ( $\mu_{S_{max}}$ ), угла начального наклона характеристики ( $\tau$ ) зависят от угла между скоростью скольжения и серединной плоскостью колеса. В модели [36] предполагается, что сила взаимодействия противоположна скорости скольжения. В модели [34] дается метод определения угла между силой взаимодействия и скоростью скольжения, однако это отклонение, как правило, мало и в дальнейших построениях не рассматривается.

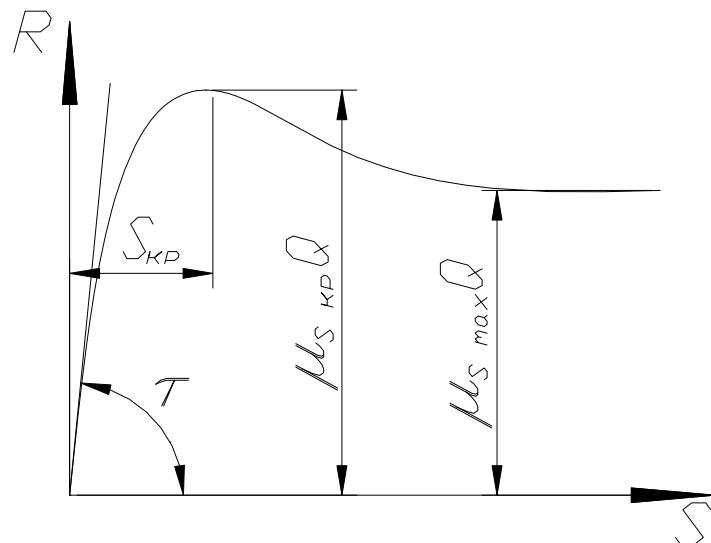


Рисунок 2.7 - Зависимость силы взаимодействия от коэффициента скольжения

В работе [34] сделана попытка распространения модели на случай нестационарного увода. При этом переносная скорость площадки контакта складывается из двух скоростей:

$$\bar{V}_{nep} = \bar{V}_{nep\,корп} + \bar{V}_{yup},$$

где  $\bar{V}_{nep\,корп}$  - переносная скорость площадки контакта вместе с корпусом машины;  $\bar{V}_{yup}$  - скорость площадки контакта относительно корпуса машины, обусловленная нарастанием деформации шины при нестационарном уводе.

Компонента  $\bar{V}_{yup}$  позволяет внести динамическую поправку в коэффициент скольжения  $S$ . Однако автор не приводит полноценных методов определения скорости  $\bar{V}_{yup}$  и в дальнейших построениях ограничивается анализом установившихся реакций.

Преимущество моделей с прямоугольным отпечатком в их универсальности. Подобные модели одинаково хорошо описывают практически любые режимы работы колеса (бортовой поворот [35], движение с большими уводами [34], разгоны и торможения). Также подобные модели эффективно работают в том случае, когда отсутствует исчерпывающая информация о моделируемой системе, а необходимую информацию можно получить из несложного эксперимента. Модели сравнительно просты и нетребовательны к вычислительным ресурсам.

Однако эти модели не позволяют добиваться высокой точности и эффективны в тех случаях, когда точность исходных данных невысока и рассматриваются достаточно общие вопросы динамики машины, что вполне допустимо при исследовании систем активной безопасности.

Модели с «натянутой нитью» или «упругим кольцом» можно считать развитием моделей с прямоугольным отпечатком. Подобные теории излагаются в работах [33, 28, 32]. В таких моделях брекер колеса представляется натянутой нитью или упругим кольцом, соединенным со ступицей упругими и демпфирующими элементами (рис.2.8.).

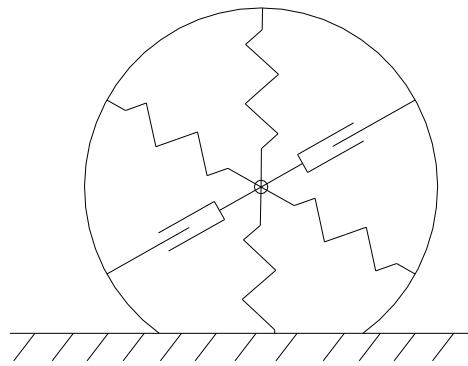


Рисунок 2.8 - Расчетная схема для моделей с «натянутой нитью» и «упругим кольцом»

Причем элементы расположены как в радиальном, так и в осевом направлении. Подобные теории развиваются для более строгого учета поворота и деформации контактной площадки при уводе.

Различие между моделями с нитью и с кольцом заключается в том, что кривизна нити может изменяться скачкообразно, а гибкое кольцо всегда представляет собой гладкую кривую.

Используя изложенные выше представления можно записать следующие уравнения для участка брекера, находящегося в контакте:

$$-T \frac{d^2 q}{ds^2} + kq = p(s) \text{ - для «натянутой нити»;}$$

$$EI \frac{d^4 q}{ds^4} + kq = p(s) \text{ - для «упругого кольца»;}$$

где  $T$  - начальное натяжение нити,

$k$  - жесткость условных осевых упругих элементов;

$E$  - модуль упругости упругого кольца;

$p(s)$  - осевая нагрузка;

$q(s)$  - осевая деформация нити или кольца.

Осевая сила может быть определена по выражению:

$$R_y = \int_{-l}^l p(s) ds,$$

где  $2l$  - длина контактного отпечатка.

Для решения записанных дифференциальных уравнений требуется введение соответствующего количества начальных условий. Определение начальных условий представляет непростую задачу и вынуждает авторов принимать дополнительные допущения. Так в работе [32] при исследовании модели с натянутой нитью предполагается, что

$$\frac{(q(0)-q(l))}{2l} \approx \operatorname{tg}(\delta)$$

и получается результат в виде:

$$\begin{cases} R_y = 2k\delta(l + \sigma)^2 \\ R_x = -2kl\delta\left(\frac{l^3}{3} + \sigma(l + \sigma)\right), \end{cases}$$

где  $\sigma$  - релаксационная длина шины.

Как можно видеть решение содержит величину полудлины контактного отпечатка  $l$ , для определения которой требуется решение аналогичных уравнений для радиальной деформации шины. Также в решение входят параметры  $\sigma$  и  $k$ , зависимость которых от эксплуатационных и конструктивных факторов недостаточно изучена.

Модели с «натянутой нитью» или «кольцом» позволяют получить решения, содержащие деформацию не только на участке брекера находящемся в контакте, но и на других участках шины. В том числе, деформация может быть не равна нулю в самой верхней точке колеса.

Однако авторы, развивающие такой подход [28, 32], используют описанную теорию только для качественного описания процессов, происходящих при контакте колеса с грунтом, и применяют в дальнейшем анализе более простые модели.

Несмотря на более детальный подход к изучению динамики взаимодействия колеса с поверхностью, описанные модели вынуждают вводить ряд допущений относительно начальных условий при решении дифференциальных уравнений деформации. Предположение о линейной упругости элементов шины является серьезным допущением. Учет демпфирующих свойств шины еще более усложняет модель и вынуждает вводить дополнительные допущения. Модель требует многих недостаточно изученных коэффициентов.

Модели в рамках первого подхода базируются на анализе неголономных кинематических связей деформируемого колеса и поверхности. Подход был заложен М.В. Келдышем и в дальнейшем развивался многими авторами. При применении подхода Келдыша задача сводится к построению некоторой функции, описывающей потенциальную энергию системы в зависимости от параметров деформации. Далее силы и моменты, возникающие при деформации шины можно определить как производные от потенциальной энергии шины по соответствующим координатам [37]. В случае модели Келдыша используются соотношения:

$$R_z = \frac{\partial U}{\partial h}; R_y = \frac{\partial U}{\partial \xi}; M_y = \frac{\partial U}{\partial \phi}; M_z = \frac{\partial U}{\partial \gamma};$$

где параметры  $\xi, \phi, \gamma$  показаны на рис. 2.9,  $h$  – вертикальная деформация шины.

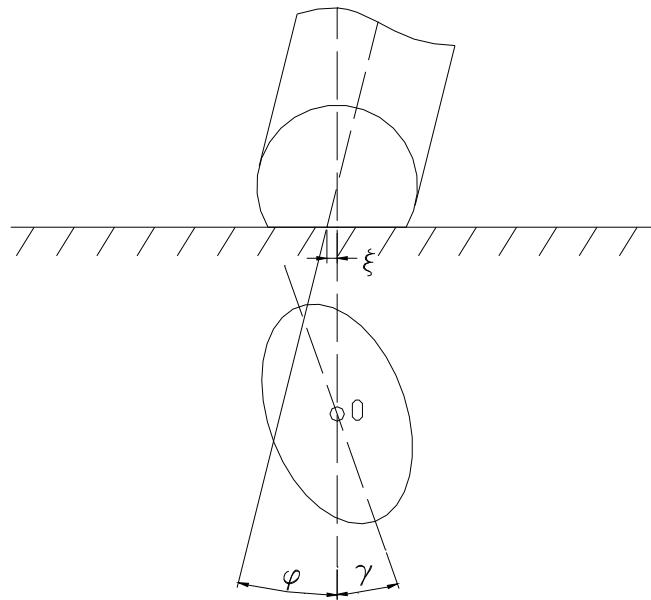


Рисунок 2.9 - Геометрические характеристики деформации шины

Для определения параметров деформации записываются условия отсутствия проскальзывания в окрестности центра контакта  $O$ :

$$V_{nep\ y} + \dot{\xi} + \nu\gamma = 0;$$

$$\dot{\phi} + \dot{\gamma} - \nu k_0 = 0;$$

$$k_0 = a_1\xi - a_2\gamma - a_3\phi;$$

где  $\nu$  - скорость точки  $O$ ,  $a_i$  - коэффициенты. Рассмотренные кинематические соотношения верны только в пределах малых деформаций.

В пределах малых деформаций силовые факторы можно определить соотношениями [38]:

$$R_y = c_{\xi}\xi + c_{\xi\phi}\phi + c_{\xi\gamma}\gamma;$$

$$M_y = c_{\phi\xi}\xi + c_{\phi\phi}\phi + c_{\phi\gamma}\gamma; M_z = c_{\gamma\xi}\xi + c_{\gamma\phi}\phi + c_{\gamma\gamma}\gamma;$$

Очевидным недостатком описанной модели является необходимость определять большое число различных коэффициентов. Многие из них недостаточно изучены.

Модель Келдыша требует отсутствия проскальзывания центра контакта по опорному основанию, что делает невозможным исследование интенсивного торможения и заноса.

Большинство приведенных соотношений верны только при малых деформациях шины, что не позволяет моделировать движение со значительными уводами.

Положительной чертой модели является возможность строгого учета динамических реакций шины при нестационарном уводе. Модель потенциально позволяет получить большую точность при условии достаточной информации об исследуемой системе.

Модель «с натянутой оболочкой» подробно рассматривается в работах [37]. Такой подход можно считать развитием модели с упругим кольцом и модели Келдыша. При этом усложняется форма функции, описывающей потенциальную энергию шины. В качестве одной из компонент рассматривается энергия сжимаемого оболочкой воздуха:

$$U_{\text{возд}} = pV_{\text{шины}}.$$

Для определения изменения объема шины в зависимости от параметров деформации рассматривается расчетная модель деформируемой оболочки (рис.2.10).

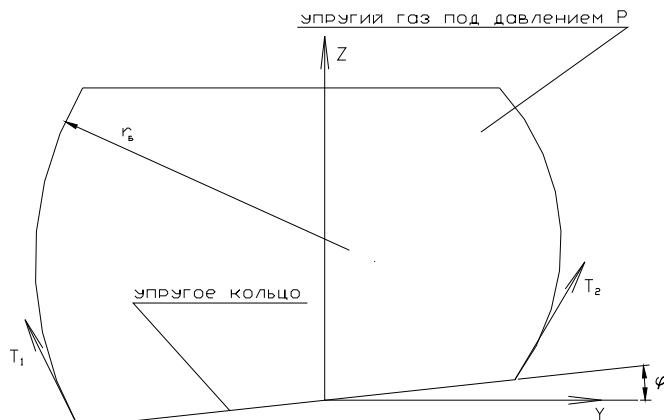


Рисунок 2.10 - Расчетная схема модели «с натянутой оболочкой»

При этом объем воздуха в шине определяется как интеграл от площади поперечного сечения. Усилие от деформации воздуха в шине определяется по соотношению:

$$F = p \cdot \Delta V_{\text{шины}},$$

что верно только в пределах малых деформаций.

Для определения радиальных и осевых деформаций брекера используется представление об упругом кольце, нагруженном силами, возникновение которых обусловлено эластичностью протектора, реакцией сжимаемого воздуха.

Сила  $T$ , с которой боковина действует на упругое кольцо, определяется по соотношению:

$$T = pr_6,$$

что верно лишь в предположении, что боковина передает силы только в продольном направлении. То есть не сопротивляется собственному изгибу.

Основные недостатки описанной модели – высокая сложность и необходимость исчерпывающих знаний об исследуемой системе. Однако модель может быть использована для расчетного определения неизвестных коэффициентов, входящих в другие модели. Также потенциально возможно получение более высокой точности в тех случаях, когда условия задачи и знание о системе позволяют сформулировать достаточно точные начальные условия для решения уравнений модели. Также недостатком является большое количество эмпирических коэффициентов и функций, поведение которых недостаточно изучено. Многие положения модели верны только в пределах малых деформаций.

Таким образом, при исследовании динамики автомобиля, оснащенного системами активной безопасности, на ровном горизонтальном основании целесообразно использовать модели с «прямоугольным отпечатком».

Рассмотрим одно из колес беспилотного АТС (рис. 2.11). Вектор скорости скольжения нижней точки колеса  $\vec{V}_{ck}''$  в системе координат  $x'' - y''$ , связанной с колесом, определяется следующим выражением:

$$\vec{V}_{ck}'' = \vec{V}_{nep}'' + \vec{V}_{omn}'' , \quad (2.9)$$

где  $\vec{V}_{nep}''$  – вектор переносной скорости в системе координат  $x'' - y''$ ;  $\vec{V}_{omn}''$  – вектор относительной скорости в системе координат  $x'' - y''$ .

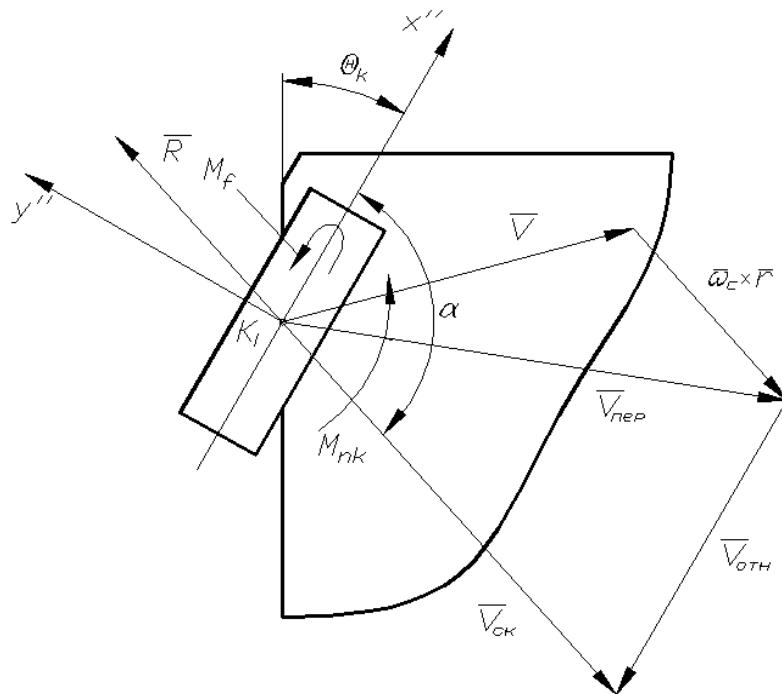


Рисунок 2.11 - Расчетная схема качения колеса

Проекции вектора переносной скорости на оси системы координат  $x - y$ :

$$\begin{aligned} V_{nepx} &= V_x - \omega_z \cdot y_k; \\ V_{nepy} &= V_y + \omega_z \cdot x_k, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где  $V_x$ ,  $V_y$  – проекции вектора скорости центра масс беспилотного АТС на оси системы координат  $x - y$ ;  $\omega_z$  – угловая скорость поворота беспилотного АТС;  $x_k$ ,  $y_k$  – координаты колеса в системе координат  $x - y$ .

Поясним выражения (2.10). Известно, что вектор переносной скорости некоторой точки равен сумме вектора скорости точки начала подвижной

системы координат (ПСК) и векторного произведения вектора угловой скорости вращения  $\vec{\omega}$  ПСК относительно неподвижной системы координат (НСК) на радиус-вектор  $\vec{p}_k$ , определяющий положение рассматриваемой точки в ПСК [19], т. е.  $\vec{V}_{nep} = \vec{V} + \vec{\omega}_z \times \vec{p}_k$  (см. рис. 2.10).

Проекции вектора переносной скорости на оси системы координат  $x'' - y''$ :

$$\begin{aligned} V_{nepx''} &= (V_x - \omega_z \cdot y_k) \cdot \cos \theta_k + (V_y + \omega_z \cdot x_k) \cdot \sin \theta_k; \\ V_{nepy''} &= -(V_x - \omega_z \cdot y_k) \cdot \sin \theta_k + (V_y + \omega_z \cdot x_k) \cdot \cos \theta_k, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где  $\theta_k$  – угол поворота колеса относительно корпуса беспилотного АТС.

Проекции вектора относительной скорости на оси системы координат  $x'' - y''$ :

$$\begin{aligned} V_{omnx''_i} &= -\omega_{ki} \cdot r_{k0i}; \\ V_{omny''_i} &= 0, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $r_{k0i}$  – радиус  $i$ -го колеса в свободном режиме качения,  $\omega_{ki}$  – угловая скорость вращения  $i$ -го колеса.

Радиус колеса в свободном режиме качения  $r_{k0i}$  зависит от величины нормальной реакции  $R_z$ .

Тогда проекции вектора скорости скольжения на оси системы координат  $x'' - y''$  будут иметь вид:

$$\begin{aligned} V_{cpx''} &= (V_x - \omega_z \cdot y_k) \cdot \cos \theta_k + (V_y + \omega_z \cdot x_k) \cdot \sin \theta_k - \omega_k \cdot r_{k0i}; \\ V_{cpy''} &= -(V_x - \omega_z \cdot y_k) \cdot \sin \theta_k + (V_y + \omega_z \cdot x_k) \cdot \cos \theta_k. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Угол поворота вектора скорости скольжения  $\alpha$  относительно оси  $x''$  определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= \frac{V_{c k y''}}{V_{c k}} ; \\ \cos \alpha &= \frac{V_{c k x''}}{V_{c k}} ; \\ V_{c k} &= \sqrt{V_{c k x''}^2 + V_{c k y''}^2} .\end{aligned}\tag{2.14}$$

Величину силы взаимодействия с грунтом определяют по зависимости [24]:

$$R = \mu_s \cdot R_z, \tag{2.15}$$

где  $\mu_s$  – коэффициент взаимодействия движителя с опорным основанием,  $R_z$  – нормальная реакция.

Для несвязных грунтов характерна следующая зависимость коэффициента взаимодействия от коэффициента буксования:

$$\mu_s = \mu_{s\alpha \max} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{S_k}{S_0}} \right), \tag{2.16}$$

где  $\mu_{s\alpha \max}$  – коэффициент взаимодействия при полном скольжении для данного угла поворота вектора скорости скольжения  $\alpha$  относительно оси  $x''$ ;  $S_k$  – коэффициент скольжения;  $S_0$  – константа, определяющая форму кривой.

Величина  $\mu_{s\alpha \max}$  определяет максимальное значение функции  $\mu_s(S_k)$ , а в совокупности с константой  $S_0$  – градиент функции  $\mu_s(S_k)$  в начале координат.

Выражение для производной от функции  $\mu_s(S_k)$  в начале координат имеет вид:

$$\left. \frac{d\mu_s(S_k)}{dS_k} \right|_{S_k=0} = \frac{\mu_{s\alpha \max}}{S_0}. \tag{2.17}$$

Ниже представлены графики функции  $\mu_s(S_k)$  при различных значениях  $\mu_{s\alpha \max}$  и  $S_0$ .

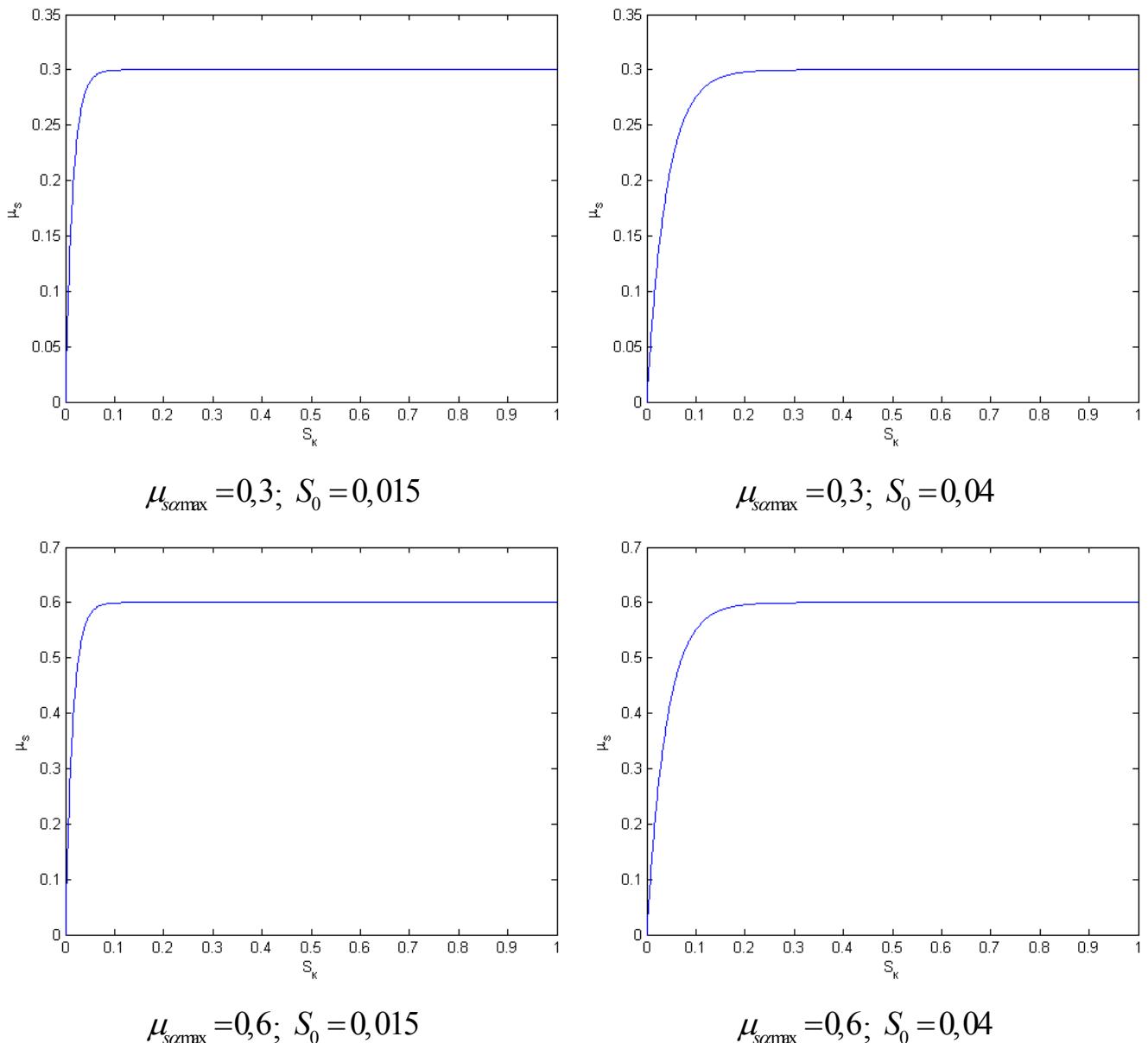


Рисунок 2.12 - Примеры графиков функции  $\mu_s(S_k)$

Для связных грунтов справедливо следующее выражение для  $\mu_s(S_k)$ :

$$\mu_s = \mu_{s\max} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{S_k}{S_0}} \right) \cdot \left( 1 + e^{-\frac{S_k}{S_1}} \right), \quad (2.18)$$

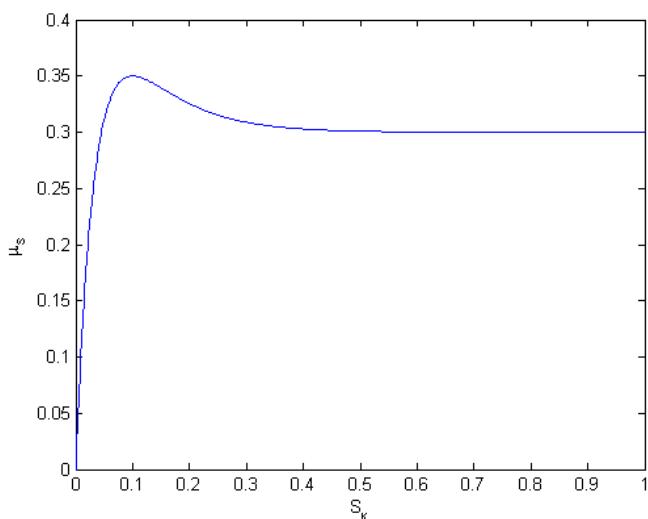
где  $S_0$  и  $S_1$  – константы, определяющие форму кривой.

Величина  $\mu_{s\alpha\max}$  определяет значение функции  $\mu_s(S_k)$  при  $S_k \rightarrow \infty$ , а в совокупности с константами  $S_0$  и  $S_1$  – координаты точки экстремума функции  $\mu_s(S_k)$  ( $S_{extr}$ ,  $\mu_{extr}$ ).

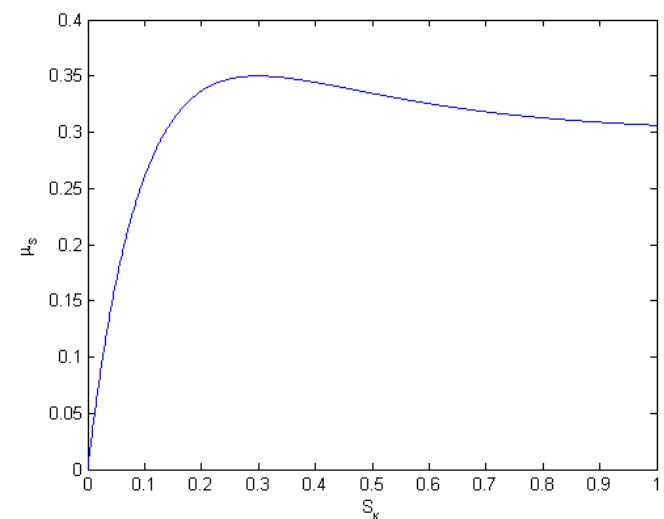
Константы  $S_0$  и  $S_1$  находятся из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \mu_{s\alpha\max} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{S_{extr}}{S_0}} \right) \cdot \left( 1 + e^{-\frac{S_{extr}}{S_1}} \right) = \mu_{extr}; \\ \frac{e^{-\frac{S_{extr}}{S_0}} \cdot \left( 1 + e^{-\frac{S_{extr}}{S_1}} \right)}{S_0} - \frac{e^{-\frac{S_{extr}}{S_1}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{S_{extr}}{S_0}} \right)}{S_1} = 0. \end{cases} \quad (2.19)$$

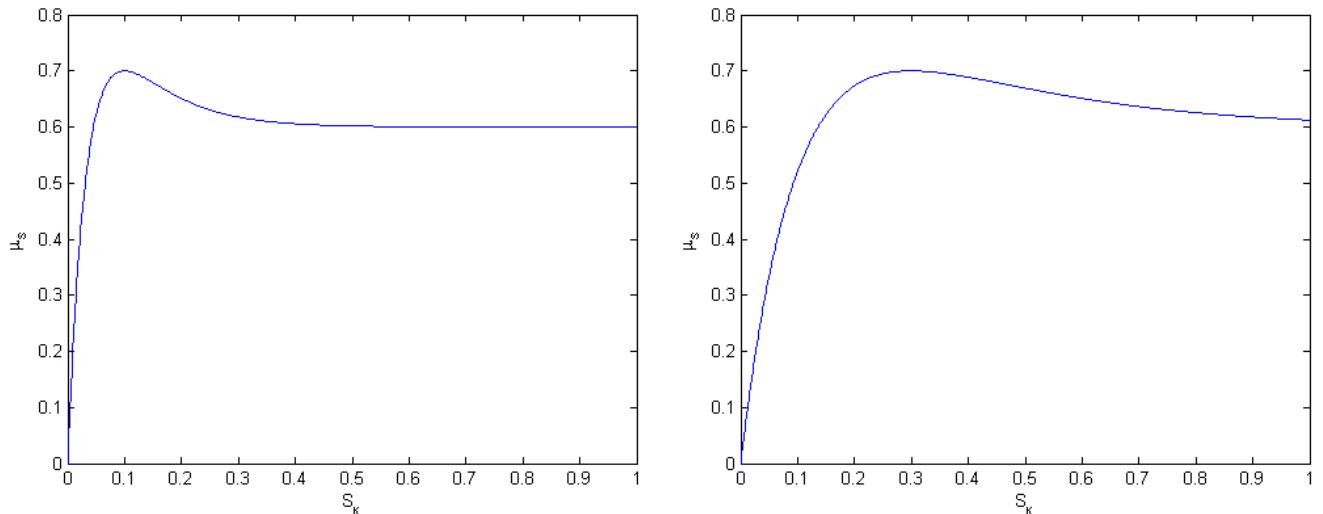
Ниже представлены графики функции  $\mu_s(S_k)$  при различных значениях  $S_1$ .



$$\mu_{s\alpha\max} = 0,3; S_0 = 0,0458; S_1 = 0,0864$$



$$\mu_{s\alpha\max} = 0,3; S_0 = 0,1373; S_1 = 0,2593$$



$$\mu_{sx\max} = 0,6; S_0 = 0,0458; S_1 = 0,0864$$

$$\mu_{sx\max} = 0,6; S_0 = 0,1373; S_1 = 0,2593$$

Рисунок 2.13 - Примеры графиков функции  $\mu_s(S_k)$

Коэффициент взаимодействия при полном скольжении [24]:

$$\mu_{s\alpha\max} = \frac{\mu_{sx\max} \cdot \mu_{sy\max}}{\sqrt{\mu_{sx\max}^2 \cdot \sin^2 \alpha + \mu_{sy\max}^2 \cdot \cos^2 \alpha}}, \quad (2.20)$$

где  $\mu_{sx\max}$ ,  $\mu_{sy\max}$  – параметры эллипса трения (рис. 2.14).

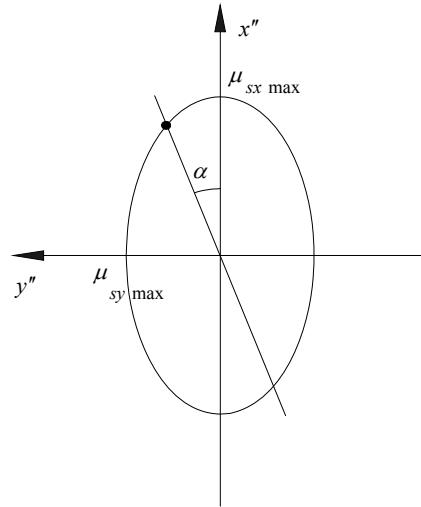


Рисунок 2.14 - Эллипс трения

При изменении величины нормальной реакции  $R_i$ , параметры эллипса трения меняются.

Коэффициент скольжения:

$$S_k = \frac{V_{ck}}{\omega_k \cdot r_{k0}}, \quad (2.21)$$

Вектор силы взаимодействия с грунтом  $\vec{R}''$  направлен противоположно вектору скорости скольжения  $\vec{V}_{ck}''$ .

Проекции вектора силы взаимодействия с грунтом на оси системы координат  $x'' - y''$ :

$$\begin{aligned} R_{x''} &= -R \cdot \cos \alpha; \\ R_{y''} &= -R \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Проекции вектора силы взаимодействия с грунтом на оси системы координат  $x - y$ :

$$\begin{aligned} R_x &= R_{x''} \cdot \cos \theta_k - R_{y''} \cdot \sin \theta_k; \\ R_y &= R_{x''} \cdot \sin \theta_k + R_{y''} \cdot \cos \theta_k. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Момент сопротивления качению колеса  $M_{f_i}$ , действующий в плоскости его вращения, согласно [28] определяют по зависимости:

$$M_{f_i} = f \cdot R_{zi} \cdot r'_{ki}, \quad (2.24)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления качению колеса;  $r'_{ki}$  – радиус качения без скольжения  $i$ -го колеса.

Численное моделирование движения беспилотного АТС может быть проведено на различных типах опорного основания. Отметим, что для данной математической модели под термином «опорное основание» понимается только твердая недеформируемая опорная поверхность.

Математическая модель позволяет варьировать исходные параметры для описания характеристик опорного основания. Рассмотрим примеры моделирования трех, распространенных при эксплуатации ТС, типов опорного основания.

«Лед со снегом».

Пусть опорное основание «Лед со снегом» характеризуется следующими параметрами:  $\mu_{\text{symax}} = 0,3$ ;  $\mu_{\text{symin}} = 0,3$ ;  $S_0 = 0,05$ ;  $S_1 = 0,1$ ;  $f = 0,05$ .

Функция  $\mu_s(S)$  для этого случая изображена на рис. 2.15.

«Грунтовое основание».

Пусть «Грунтовое основание» характеризуется следующими параметрами:  $\mu_{\text{symax}} = 0,6$ ;  $\mu_{\text{symin}} = 0,6$ ;  $S_0 = 0,05$ ;  $S_1 = 0,1$ ;  $f = 0,05$ . Функция  $\mu_s(S)$  для этого случая изображена на рис. 2.16.

«Микст».

Опорное основание «Микст» задается следующим образом. На первом этапе вся площадка разбивается на квадраты. Затем, с использованием генератора случайных чисел, каждому квадрату присваиваются свойства либо «Льда со снегом», либо «Грунтового основания». На рис. 2.17 изображен фрагмент сгенерированного опорного основания «Микст».

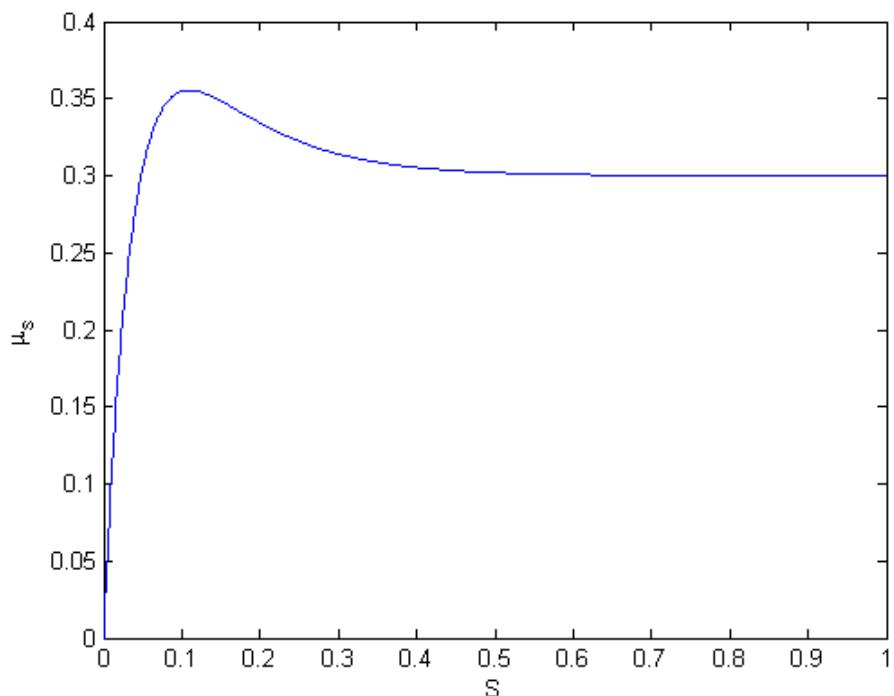


Рисунок 2.15 – Зависимость  $\mu_s(S)$  для опорного основания «Лед со снегом»

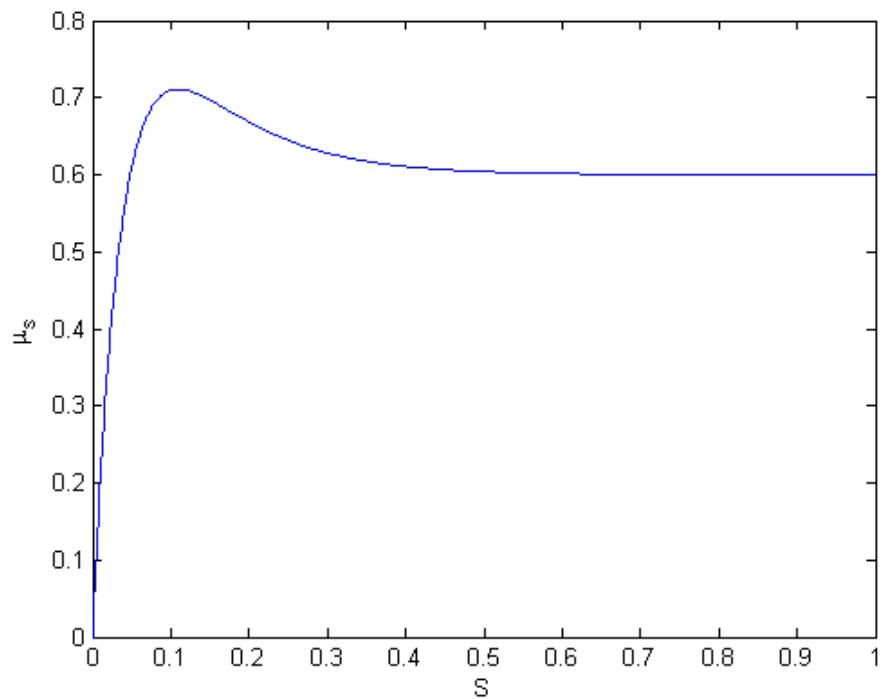


Рисунок 2.16 – Зависимость  $\mu_s(S)$  для опорного основания  
«Грунтовое основание»

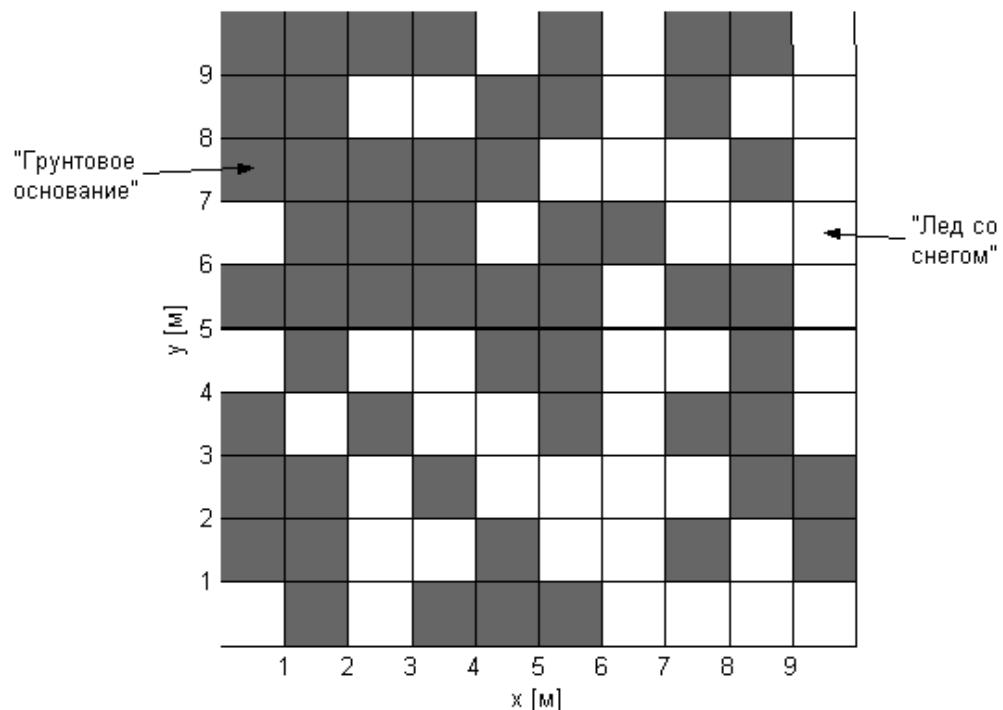


Рисунок 2.17 - Опорное основание «Микст»

На основе описанного подхода можно задаться любыми характеристиками опорного основания, в том числе, и для случая движения беспилотного АТС по «миксту».

Для колесной машины при определении момента сопротивления повороту  $M_{nk}$  для подстановки в (2.1) целесообразно воспользоваться не теорией бокового увода, а использовать следующие зависимости [28]:

$$\begin{cases} M_{nk} = \frac{M_{nkMAX}}{1 + \frac{0,15}{k(s) \cdot B_K}}; \\ M_{nkMAX} = 0,375 \cdot \mu_{\max} \cdot R_{zi} \cdot \sqrt{\frac{\pi L_K B_K}{4}}, \end{cases} \quad (2.25)$$

где  $M_{nk}$  – момент сопротивления повороту одиночного колеса, катящегося по дуге кривизной  $k(s)$ ,  $M_{nkMAX}$  – максимальный момент сопротивления повороту на месте одиночного колеса,  $L_K, B_K$  – длина и ширина отпечатка шины, соответственно.

Выбранное описание силы взаимодействия наиболее точно характеризует движение беспилотного АТС с большими углами увода. Такой подход предложен в работах Ю.Л. Рождественского [35] и А.Б. Дика [34].

## 2.2.5 Математическое моделирование трансмиссии беспилотного АТС

Принцип разработки математической модели трансмиссии, использованный в работе, рассмотрим на примере распределения мощности переднеприводного автомобиля «LADA-Калина».

Динамика трансмиссии переднеприводного беспилотного АТС с симметричным дифференциалом описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} J_{\kappa} \cdot \dot{\omega}_{\kappa 1} = \frac{M_{12}}{2} \cdot U_{GP} \cdot \eta_{GP} - M_1; \\ J_{\kappa} \cdot \dot{\omega}_{\kappa 2} = \frac{M_{12}}{2} \cdot U_{GP} \cdot \eta_{GP} - M_2; \\ \frac{\dot{\omega}_{\delta}}{U_{GP} \cdot U_{KPi}} = \frac{\dot{\omega}_{\kappa 1} + \dot{\omega}_{\kappa 2}}{2}; \\ (J_{\delta} \cdot U_{KPi}^2 + J_{KPi}) \cdot \frac{\dot{\omega}_{\delta}}{U_{KPi}} = M_{\delta} \cdot U_{KPi} \cdot \eta_{KPi} - M_{12}, \end{cases} \quad (2.26)$$

где  $J_{\kappa}$  – момент инерции колеса,  $J_{\delta}$  – момент инерции двигателя,  $J_{KPi}$  – момент инерции вращающихся частей коробки передач на  $i$ -ой передаче,  $\dot{\omega}_{\kappa i}$  – угловое ускорение  $i$ -го колеса,  $M_i$  – момент сопротивления на  $i$ -ом колесе,  $M_{12}$  – момент сопротивления, приведенный к выходному валу коробки передач,  $\dot{\omega}_{\delta}$  – угловое ускорение вала двигателя,  $M_{\delta}$  – момент, развиваемый двигателем,  $U_{KPi}$  – передаточное число коробки передач на  $i$ -ой передаче,  $U_{GP}$  – передаточное число главной передачи,  $\eta_{GP}$  – КПД главной передачи,  $\eta_{KPi}$  – КПД коробки передач.

$$M_i = R_{ix''} \cdot r_{\delta} + M_{mi} + M_{fi}, \quad (2.27)$$

где  $M_{mi}$  – тормозной момент на  $i$ -ом колесе;  $R_{ix''}$  – проекции вектора силы взаимодействия с грунтом на оси системы координат  $x''-y''$ ;  $r_{\delta}$  – расстояние от оси колеса до опорной поверхности.

Схема трансмиссии беспилотного АТС с колесной формулой 4x2 представлена на рис. 2.18.

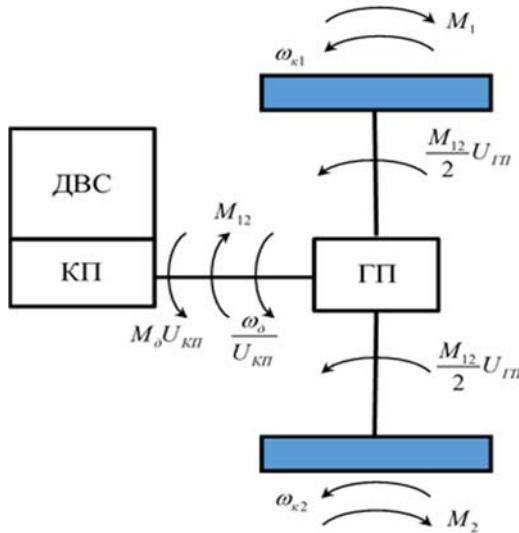


Рисунок 2.18 - Схема трансмиссии заднеприводного автомобиля

## 2.3 Математическое моделирование систем управления движением БАС

### 2.3.1 Рулевое управление

При традиционной схеме рулевого управления для двухосной колесной машины полюс рулевого управления (проекция кинематического центра поворота на продольную ось) находится на задней оси беспилотного АТС. Задние колеса являются неповоротными. Рулевая трапеция для первой оси задаётся следующим образом.

Предполагается, что угол поворота одно из колес передней оси, например, колеса 2  $\theta_{\kappa 2}$  (см. рис. 2.19) определяется воздействием водителя на рулевое колесо (жесткая связь с рулем. Возможен учет запаздываний различного рода, передаточного отношения рулевого механизма, зоны нечувствительности и т.п.).

В этом случае расстояние от центра масс  $C$  до кинематического центра поворота  $P$  определяется по следующей зависимости:

$$R_m = \frac{L}{\operatorname{tg}(\theta_{k2})} + \frac{B}{2}, \quad (2.28)$$

где  $L$  – база беспилотного АТС,  $B$  – колея беспилотного АТС.

Угол поворота колеса 1 рассчитывается по зависимости:

$$\operatorname{tg}(\theta_{k1}) = \frac{L}{R_m + \frac{B}{2}} \quad (2.29)$$

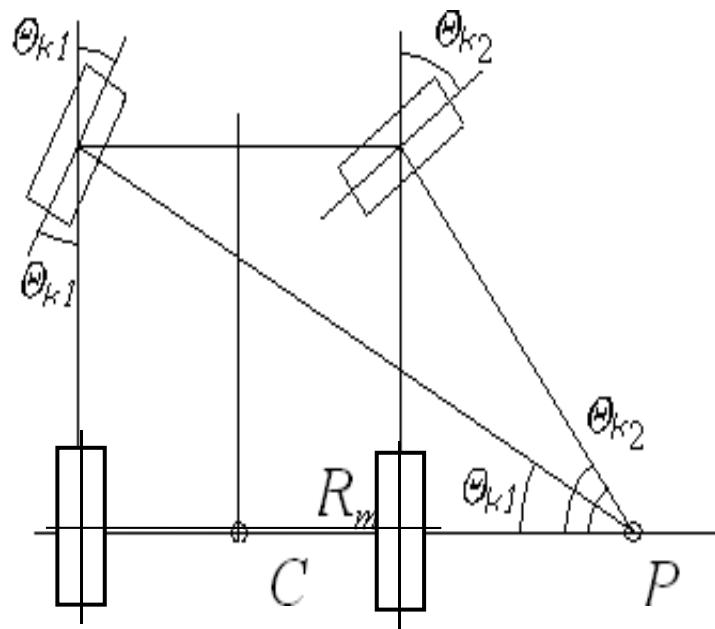


Рисунок 2.19 - Кинематика поворота колес передней оси

Для беспилотного АТС при определении момента сопротивления повороту  $M_{nki}$  целесообразно воспользоваться не теорией бокового увода, а использовать следующие зависимости:

$$\begin{cases} M_{nk} = \frac{M_{nkMAX}}{1 + \frac{0,15}{k(s) \cdot B_K}}; \\ M_{nkMAX} = 0,375 \cdot \mu_{\max} \cdot R_{zi} \cdot \sqrt{\frac{\pi L_K B_K}{4}}, \end{cases} \quad (2.30)$$

где  $M_{nk}$  – момент сопротивления повороту одиночного колеса, катящегося по дуге кривизной  $k(s)$ ,  $M_{nkMAX}$  – максимальный момент сопротивления повороту на месте одиночного колеса,  $L_K, B_K$  – длина и ширина отпечатка шины, соответственно

Динамика рулевого колеса описывается уравнением:

$$J_{pyu} \cdot \ddot{\alpha} = M_{np}, \quad (2.31)$$

где  $\alpha$  – угол поворота рулевого колеса (соответственно,  $\ddot{\alpha}$  – его угловое ускорение);  $J_{pyu}$  – момент инерции деталей рулевого управления, приведенный к рулевому колесу;  $M_{np}$  – момент, приложенный со стороны электродвигателя к рулевому колесу.

За счет изменения момента на рулевом колесе происходит его перемещение из текущего положения в желаемое по пропорционально-интегро-дифференциальному закону:

$$M_{np} = k_p \cdot (\alpha_{\text{жел}} - \alpha) + k_i \cdot \int_0^t (\alpha_{\text{жел}} - \alpha) dt + k_d \frac{d(\alpha_{\text{жел}} - \alpha)}{dt}, \quad (2.32)$$

где  $\alpha_{\text{жел}}$  – желаемый угол поворота рулевого колеса,  $k_p$ ,  $k_i$  и  $k_d$  – передаточные коэффициенты (соответственно, пропорциональный, интегральный и дифференциальный).

При этом необходимо учитывать, что полученная таким образом величина момента не должна превышать величины максимального момента, развиваемого электродвигателем:

$$|M_{np}| \leq M_{\partial,\max}, \quad (2.33)$$

Для упрощения переменная является дискретной и имеет пять возможных значений, одно из которых соответствует прямолинейному движению автомобиля.

### 2.3.2 Тормозное управление

В основной блок-схеме математической модели, реализован блок под названием  $M_{tormoz}$  (см. рис. 2.20).

В программе исходных данных могут быть заданы значения тормозных моментов на каждом из колес функции времени. Связь модели с файлом исходных данных осуществляется при помощи стандартного блока библиотеки блоков Simulink «From workspace». Таким образом, в исследовательских целях тормозной момент может варьироваться в различных пределах.

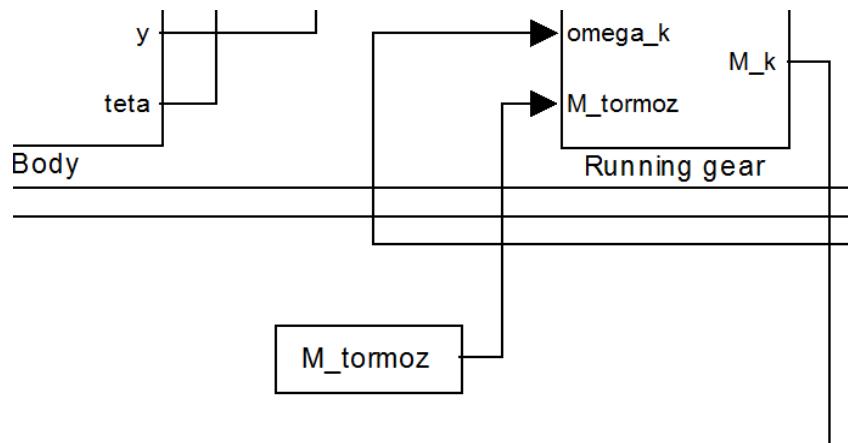


Рисунок 2.20 – Схема реализации управляющих воздействий на тормозную систему

При реализации математической модели антиблокировочной системы управляющий сигнал из блока  $M_{tormoz}$  воздействует не непосредственно на колесный движитель, а является лишь управляющим сигналом для модели

АБС, в которой результирующее воздействие на тормозную систему формируется в зависимости от принятого алгоритма.

Тормозной момент в математической модели движения беспилотного АТС учитывается в системе дифференциальных уравнений, описывающих динамику движителя.

## **2.4 Программная реализация разработанных математических моделей**

Численное моделирование движения беспилотного АТС проводилось в пакете Simulink системы Matlab. Описанная выше математическая модель была реализована в виде блок-схемы (рис. 2.21).

Блок-схема, представленная на рис. 2.21, включает в себя следующие основные блоки: блок «Кузов» (Body), в котором рассчитываются ускорения, скорости и перемещения беспилотного АТС в заданных системах координат; блок «Ходовая часть» (Running gear), в котором рассчитываются силы и моменты, действующие на беспилотного АТС. Трансмиссия представлена блоком «Transmission», в котором моделируется дифференциальная связь между колесами, а также вычисляются значения угловых скоростей колес. В Блоке «wheel» с помощью встроенной в него S-функции определяются углы поворота всех колес.

Блоки «Углы поворота колес» (« $\theta_g$ »), «Тормозные моменты» (« $M_{tormoz}$ ») и «Педаль «газ»» (« $h$ ») предназначены для подачи в систему управляющих воздействий от условного «водителя». С помощью блока управляющих воздействий « $h$ » можно варьировать степень использования мощности ДВС.

Блок «Данные для анимации» (« $animdata$ ») сохраняет в памяти ЭВМ данные, необходимые для показа анимационного ролика.

Схема блока «Кузов» приведена на рис. 2.22.

Схема блока «Ходовая часть» (рис. 2.23) включает в себя блоки «Расчет сил» («Grunt\_NSV1» и («Grunt\_SV»)) (рис. 2.24) и «Расчет нормальных реакций» («Normal reactions») (рис. 2.25). Содержимое блоков, описывающих трансмиссию беспилотного АТС, представлено на рис. 2.26.

Блоки для «Системы управления» с различными алгоритмами представлены в соответствующих разделах, где приведено их подробное математическое описание и примеры практической реализации.

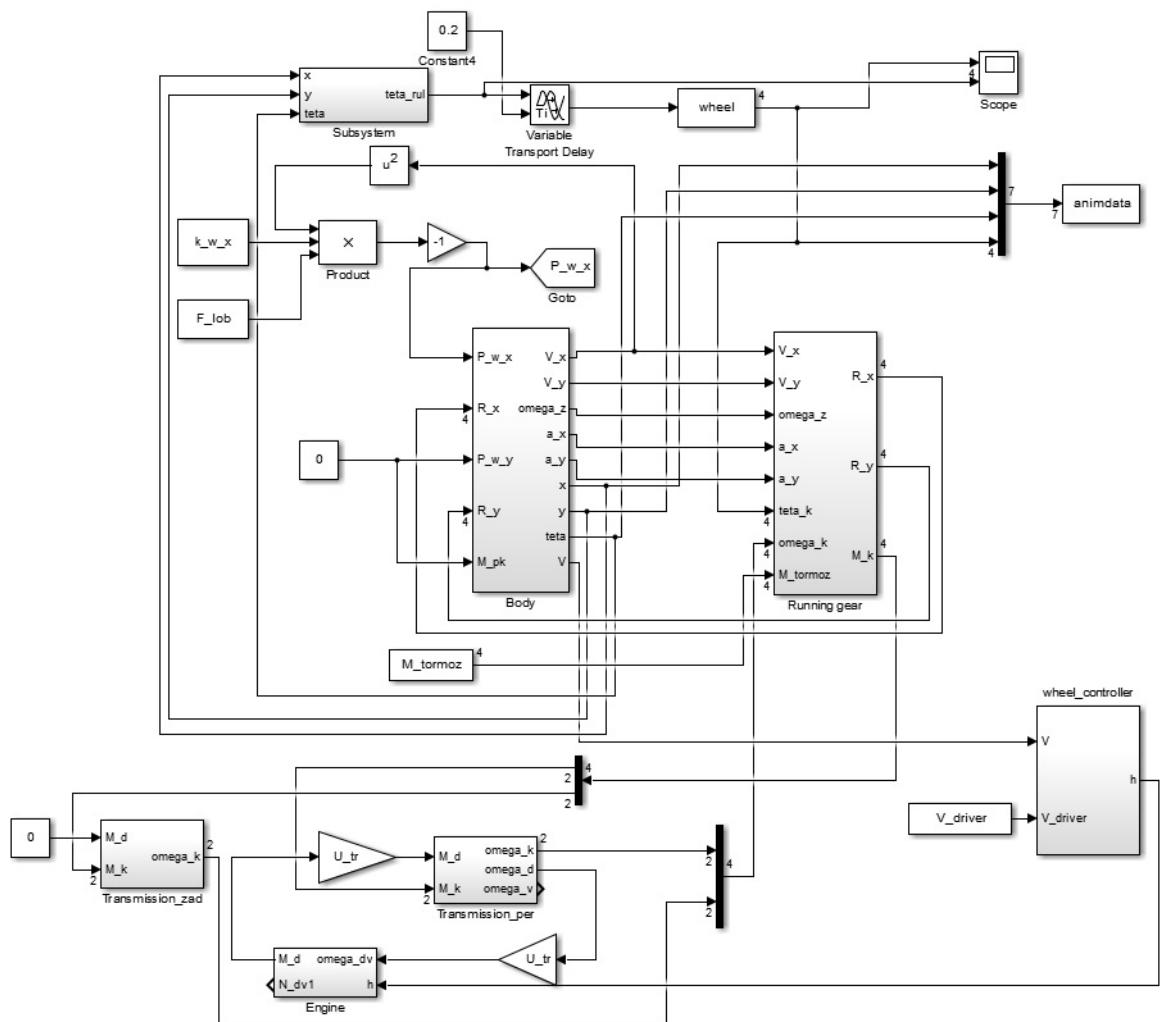


Рисунок 2.21 - Блок-схема математической модели движения беспилотного АТС

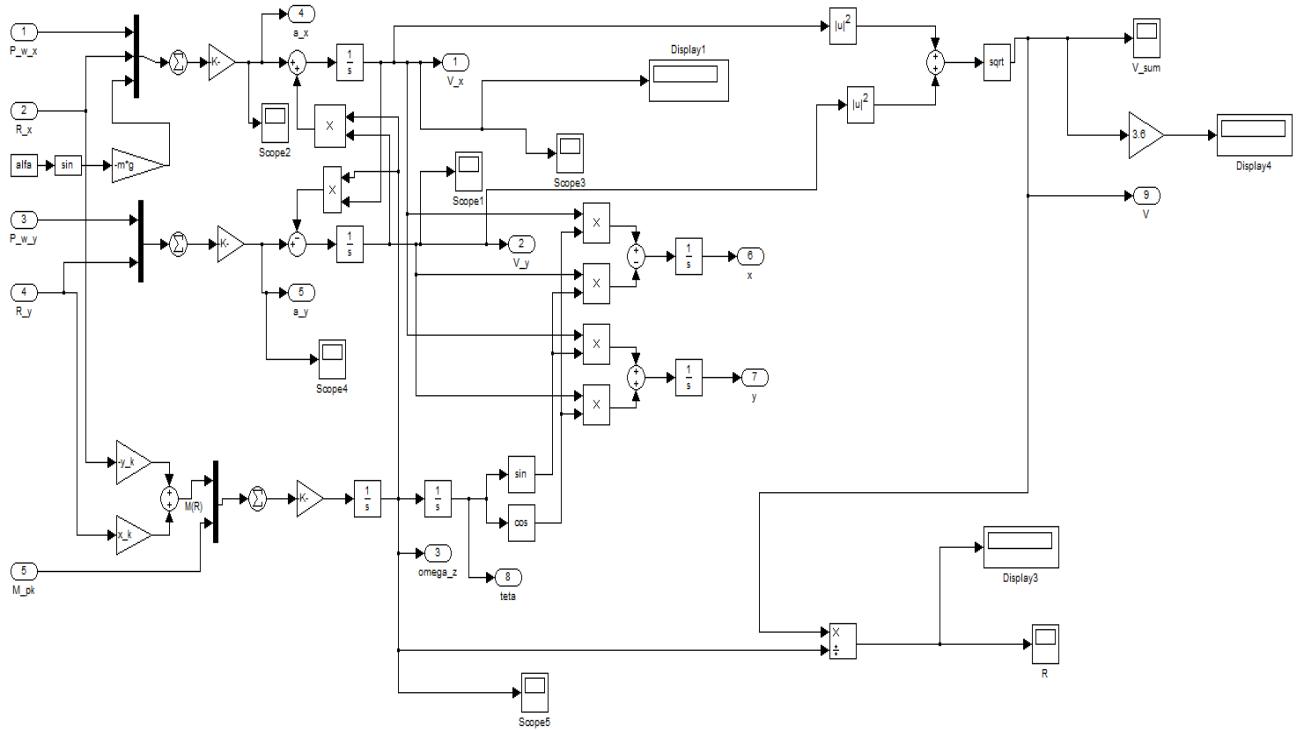


Рисунок 2.22 - Блок «Кузов»

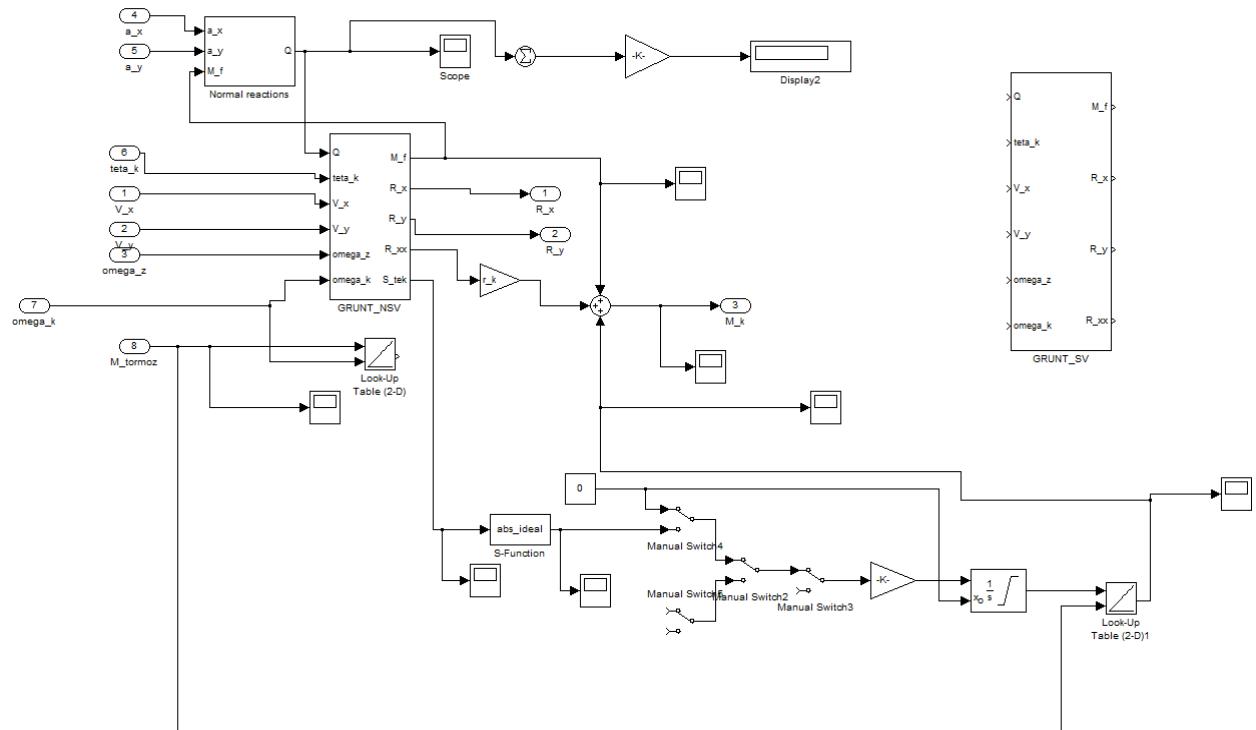


Рисунок 2.23 - Блок «Ходовая часть»

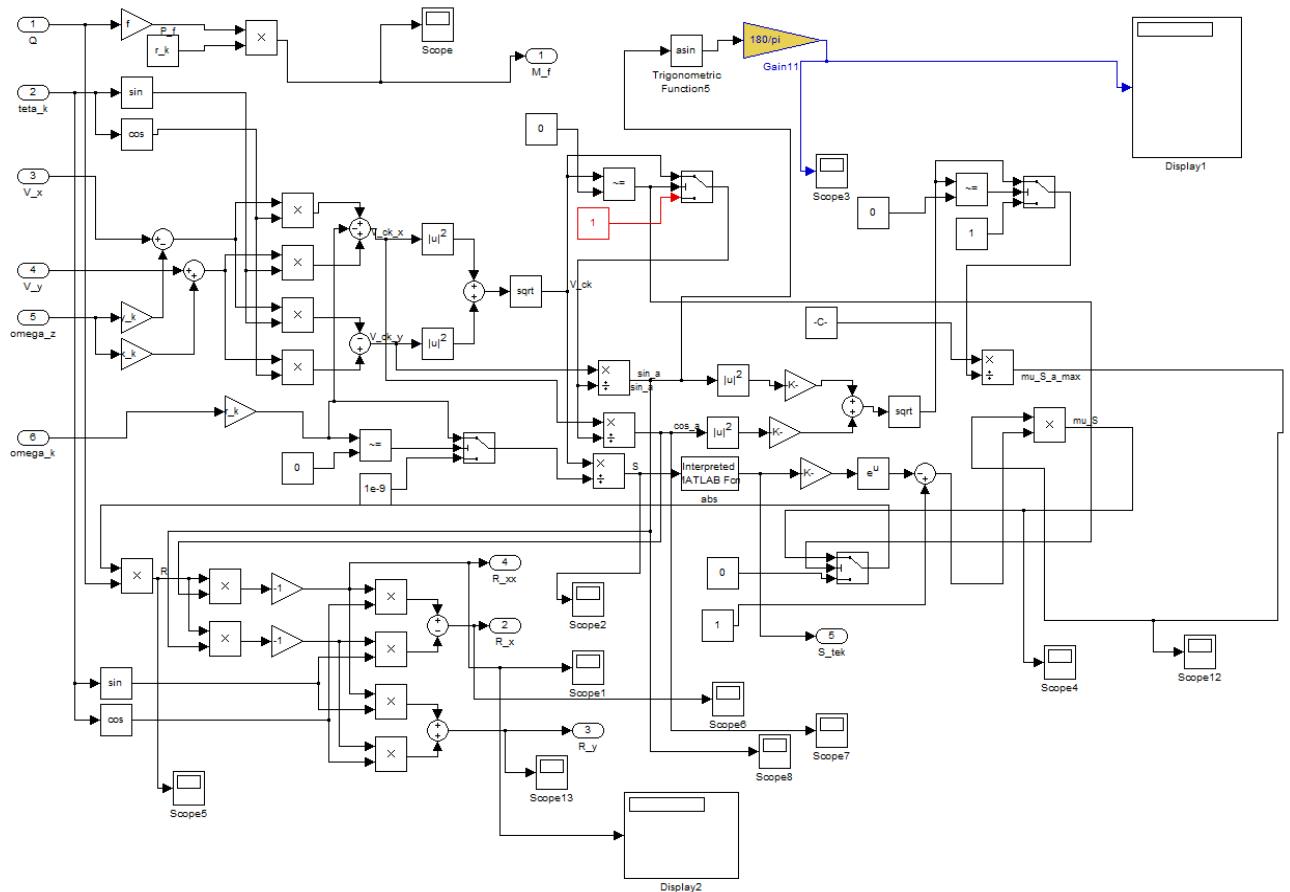


Рисунок 2.24 - Блок «Расчет сил»

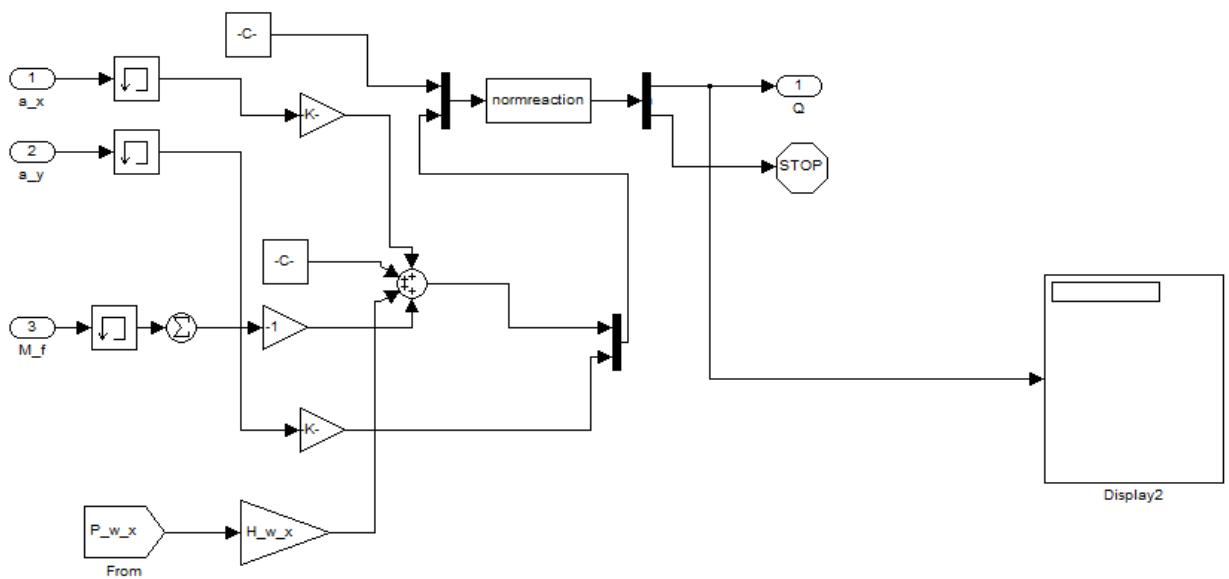


Рисунок 2.25 - Блок «Расчет нормальных реакций»

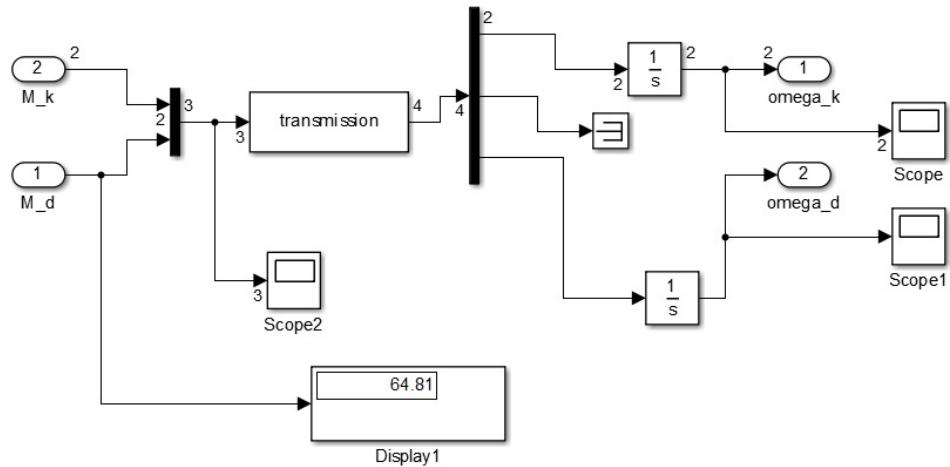


Рисунок 2.26 - Блок «Transmission»

Результаты моделирования анализируются с помощью блоков «Scope», в которых по оси абсцисс откладывается время моделирования, и блоков «Display», представляющих результаты в виде числовых значений в определенный промежуток времени расчетов.

В приложении представлены тексты программ для S-функций «normreaction», «transmission» и «wheel»; текст файла исходных данных «avto\_Kalina\_robot»; текст программы для воспроизведения анимационного ролика «planmovie». Зеленым цветом (или значком «%» в начале строки) в текстах приложений представлены «неактивные» комментарии к основному тексту программ (черный и синий цвет).

Для подтверждения адекватности созданной модели и определения ее точности результаты теоретических исследований должны быть сопоставлены с результатами натурных экспериментов.

## 2.5 Моделирование управляемых воздействий

В ряде случаев, например, при оценке характеристик движения беспилотного АТС по ГОСТ Р 52302-2004 [39] при выполнении маневров «Поворот» и

«Переставка» необходимо поддержание постоянной скорости движения. В нашем случае педаль «газ» определяет степень использования мощности ДВС.

Для организации автоматической системы поддержания скорости движения беспилотного АТС организован алгоритм, основанный на использовании аппарата нечеткой логики [40, 41], основные положения которого представлены далее.

Система управления описывается при помощи аппарата нечеткой логики и задает такое воздействие на педаль  $h$ , чтобы поддерживать заданную скорость движения. Реализуется это следующим образом.

В качестве входного сигнала фаззи-регулятора выбрана величина  $\Delta V$ , которая представляет собой относительную разницу между скоростью, с которой водитель желает двигаться  $V_{dr}$ , и действительной скоростью транспортного средства  $V_c$ :

$$\Delta V = \frac{V_c - V_{dr}}{V_{dr}} \quad (2.29)$$

Выходным параметром контроллера является  $h$  – степень использования мощности (нажатие на педаль «газ»), которая может изменяться в пределах от «0» – нет воздействия на педаль «газ», до «1» – 100% - ое нажатие.

Для входной величины, в соответствие с алгоритмом работы с аппаратом нечеткой логики, были составлены функции принадлежности сигналов (см. рис. 2.27), описывающие следующие лингвистические значения:

$\Delta V$  – отрицательное («-»), нулевое («0»), положительное («+»),

Лингвистические значения для выходной величины:

$h$  – нет воздействия на педаль «газ» («0»), частичное воздействие («+»), полное воздействие («++»).

В разработанной системе применён нечёткий логический вывод типа «Сугено», логический вывод на основе базы нечетких правил типа «Если  $x_1$ =низкий и  $x_2$ =средний, то  $y=a_0+a_1\times x_1+a_2\times x_2$ ». Эта нечеткая база знаний разделяет пространство входных переменных на нечеткие области, в которых связь между входными и выходной переменной задается линейной функцией. Результат

нечеткого логического вывода получается как взвешенная линейная комбинация результатов нечетких логических выводов по каждому правилу.

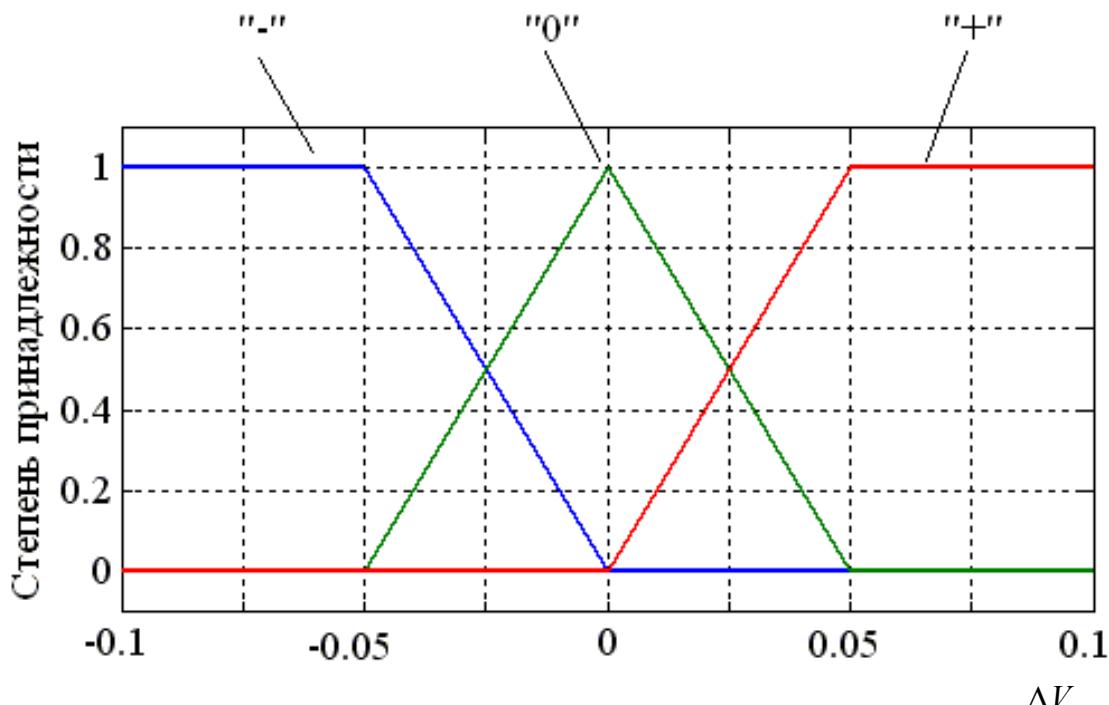


Рисунок 2.27 - Функции принадлежности входного сигнала

На основании выбранных значений (термов) были составлены 3 лингвистических правила, которые связывают входной параметр с выходной величиной, с описанием режима движения для каждого случая (табл. 2.1).

Таблица 2.1

<i>№</i>	$\Delta V$	<i>h</i>	Описание режима движения
1	-	++	Текущая скорость движения беспилотного АТС меньше желаемой скорости. Полное нажатие на педаль «газ».
2	0	+	Текущая скорость движения беспилотного АТС совпадает с желаемой скоростью. Возможно частичное нажатие на педаль «газ».
3	+	0	Текущая скорость движения беспилотного АТС больше желаемой скорости. Нет воздействия на педаль «газ»

Представленные правила позволяют построить графическую зависимость «вход-выход» (рис. 2.28):

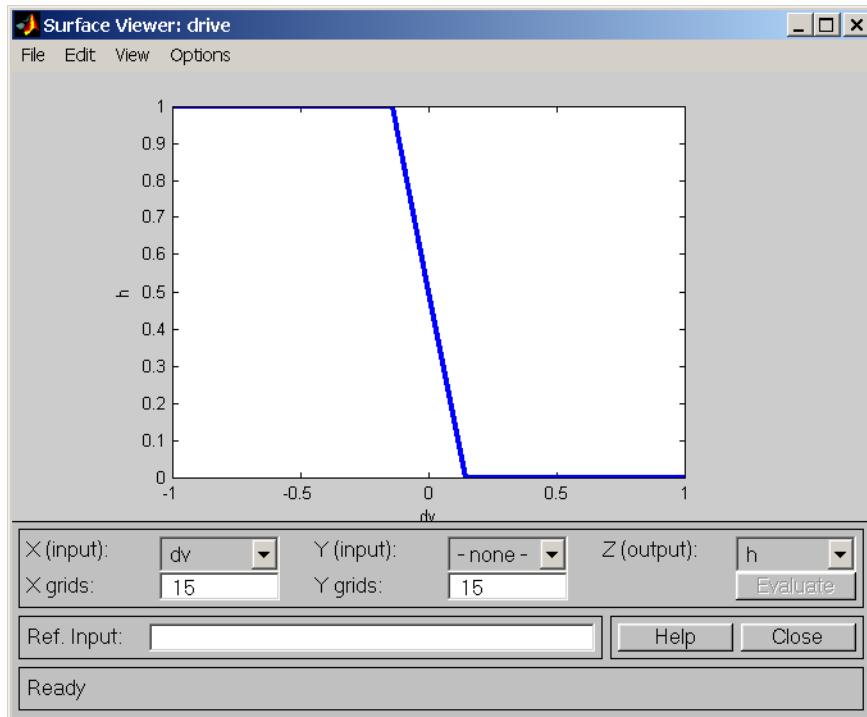


Рисунок 2.28 - Графическая зависимость «вход-выход»

Среда Matlab обладает встроенным пакетом Fuzzytoolbox по созданию систем с нечётким логическим выводом, которые могут быть свободно интегрированы в динамические модели, разработанные в системе Simulink.

На рис. 2.29-2.32 представлена программная реализация разработанного нечёткого вывода, которая иллюстрирует процесс задания функций принадлежности сигналов, лингвистических правил, а также некоторые настройки Fuzzy системы.

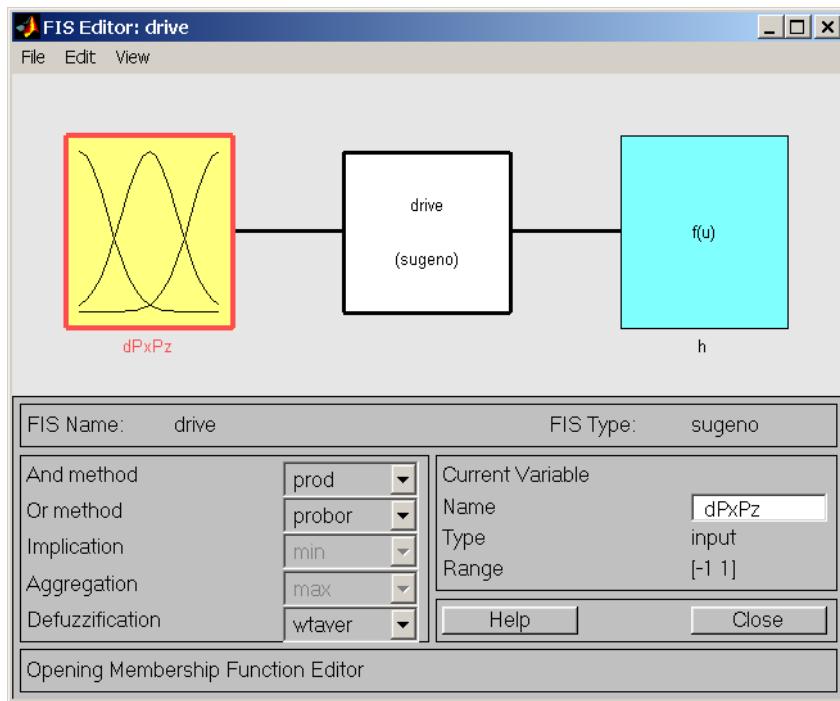


Рисунок 2.29 - Общий вид нечёткого логического вывода типа «Сугено»

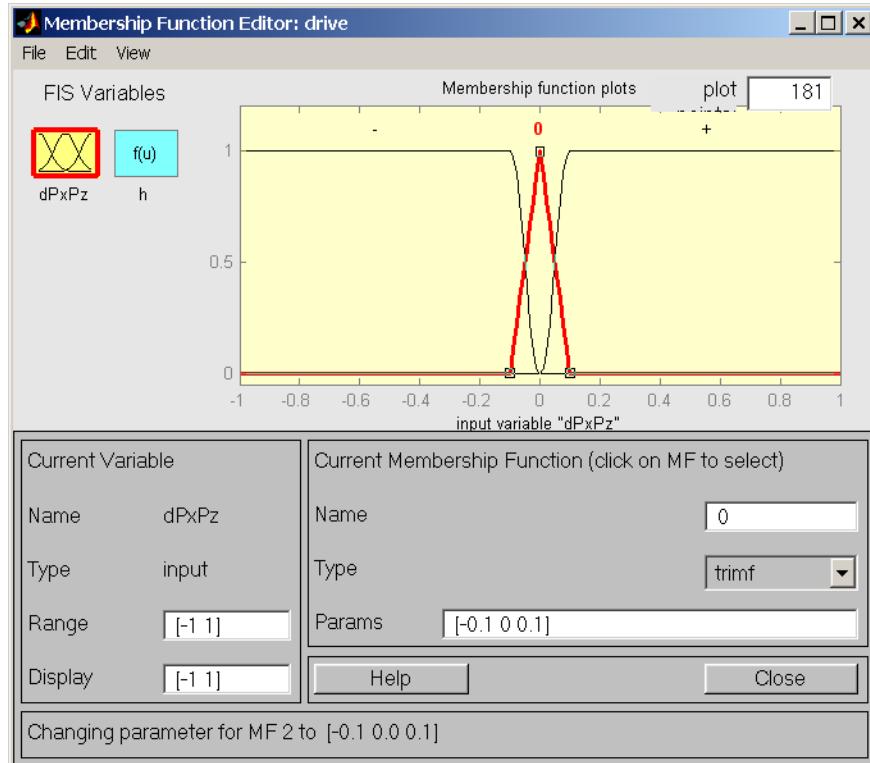


Рисунок 2.30 - Функции принадлежности входного сигнала  $\Delta V$

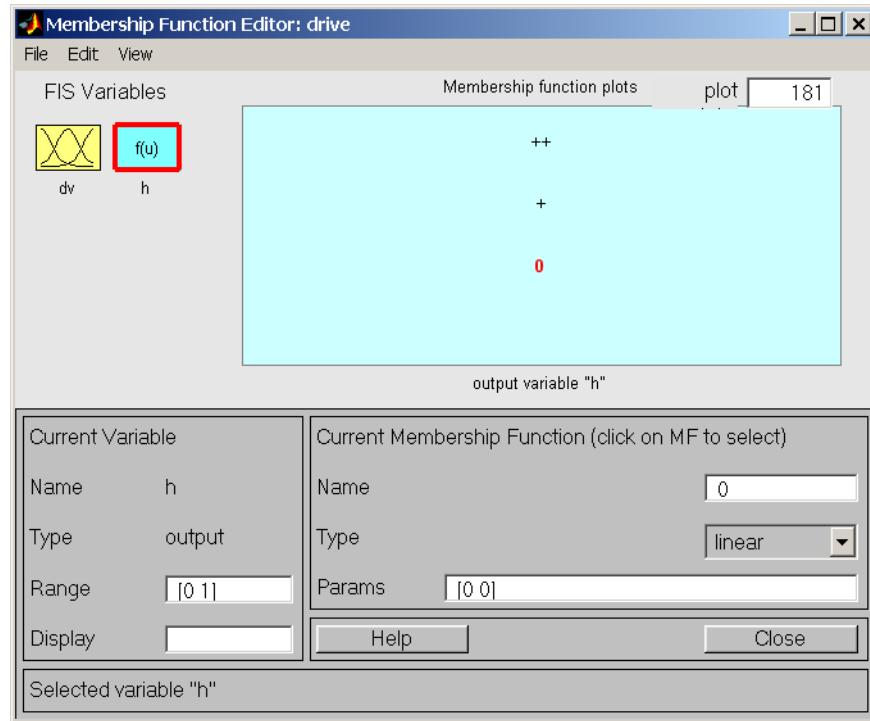


Рисунок 2.31 - Значения выходного сигнала

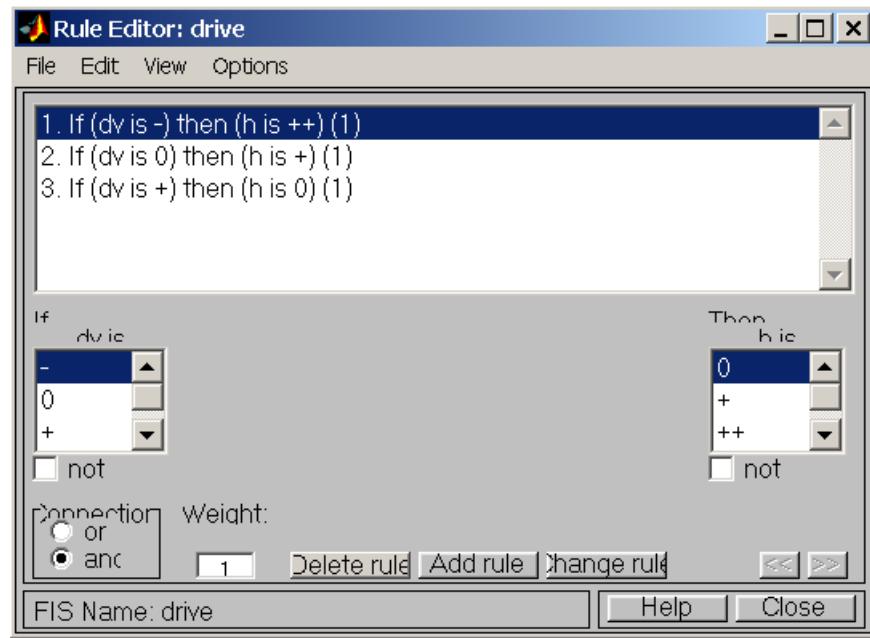


Рисунок 2.32 - Реализация лингвистических правил

Диалоговое окно Fuzzy logic системы Simulink, представленное на рис. 2.33, позволяет непосредственно в процессе моделирования наблюдать за формированием выходного сигнала в зависимости от входной величины.

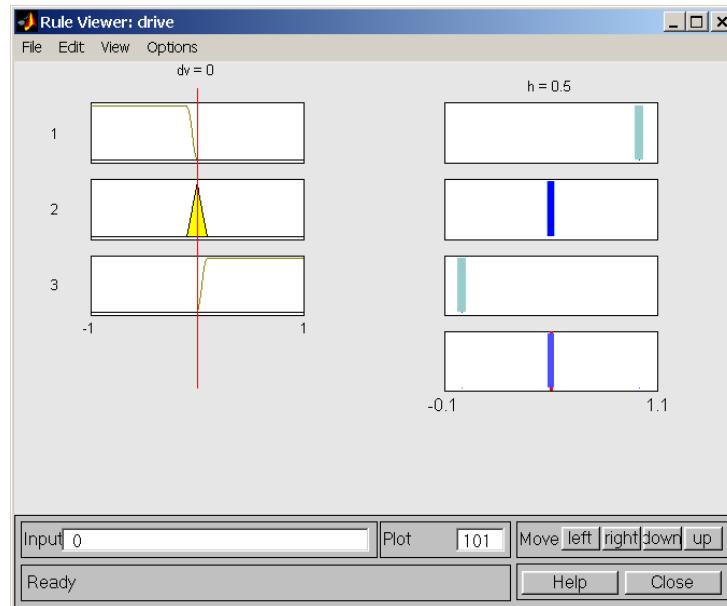


Рисунок 2.33 - Окно показа нечёткого логического вывода в зависимости от входного сигнала

В блоке «wheel\_controller» (рис. 2.34), включающим блок «control» (рис. 2.35), происходит сравнение текущей скорости движения беспилотного АТС со скоростью, заданной условным водителем («V\_driver») в файле исходных данных.

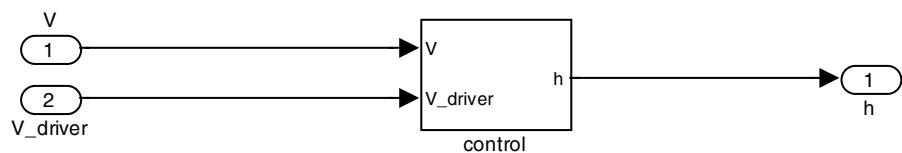


Рисунок 2.34 - Блок «wheel\_controller»

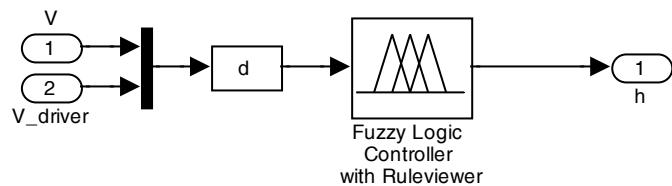


Рисунок 2.35 - Блок «Control»

Текст программы для S-функции «d» представлен в приложении.

Блок управляемой задержки сигнала Variable Transport Delay выполняет задержку входного сигнала, заданную величиной сигнала управления.

Параметры:

Maximum delay — Максимальное значение времени задержки сигнала (не отрицательное значение).

Initial input — Начальное значение выходного сигнала.

Buffer size — Размер памяти, выделяемой для хранения задержанного сигнала. Задается в байтах числом, кратным 8 (по умолчанию 1024).

Pade order (for linearization) — Порядок ряда Паде, используемого при аппроксимации выходного сигнала. Задается целым положительным числом.

В том случае, если значение управляющего сигнала задающего величину задержки превышает значение, заданное параметром Maximum delay, то задержка выполняется на величину Maximum delay.

На рис. 2.36 показан пример использования блока Variable Transport Delay. Величина времени задержки сигнала изменяется от 0.5с до 1с в момент времени равный 5с.

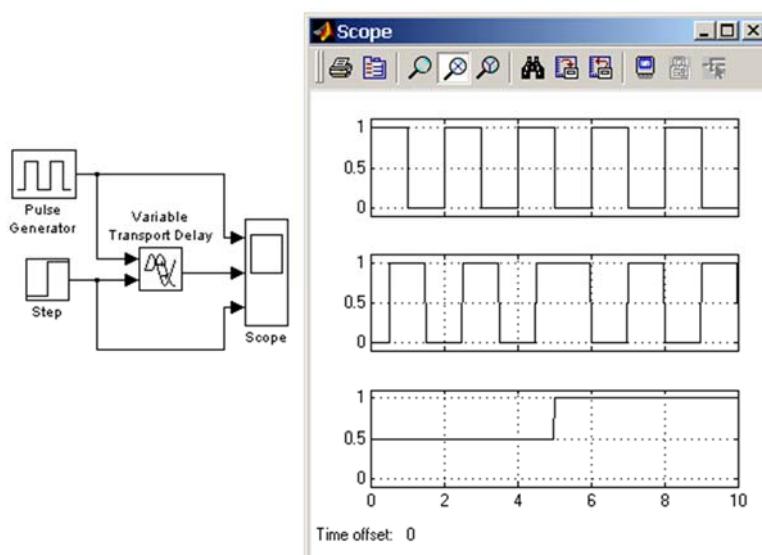


Рисунок 2.36 - Пример использования блока Variable Transport Delay.

Моделирование задержки сигнала управляющего воздействия на рулевой механизм беспилотного АТС осуществляется с помощью блока Variable Transport Delay.

## 2.6 Математическое моделирование регистрирующих и измерительных устройств системы управления движением беспилотного АТС

### 2.6.1 Математическая модель датчика угловой скорости

Датчик угловой скорости необходим для определения частоты вращения коленчатого вала двигателя или любого другого вала, частоту которого необходимо определить, например, для вычисления скорости движения автомобиля.

Рассмотрим моделирование такого устройства на примере датчика частоты вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания. Процесс моделирования аналогичных датчиков не имеет принципиальных отличий и определяется лишь иными значениями исходных параметров.

Общий вид модели датчика угловой скорости представлен на рис. 2.37.

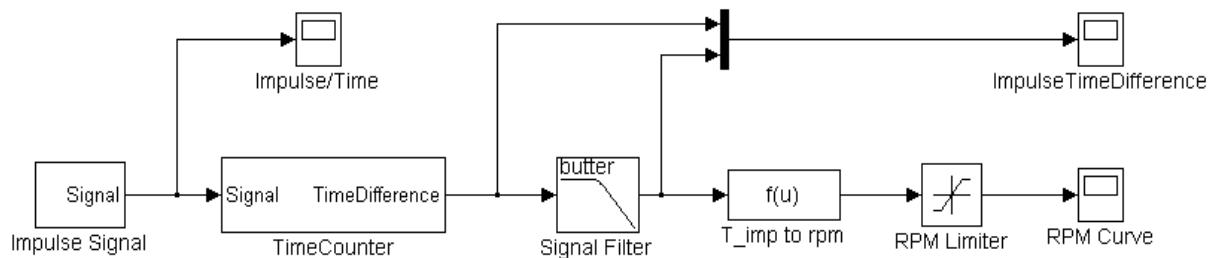


Рисунок 2.37 - Модель датчика угловой скорости в MATLAB/Simulink

В состав модели входят:

- Генератор импульсного сигнала Impulse Signal, идущего от датчика, с переменным расстоянием между двумя импульсами (для симуляции изменения частоты вращения вала, угловую скорость которого надо измерить). Состав генератора импульсного сигнала представлен на рисунке 2.38.

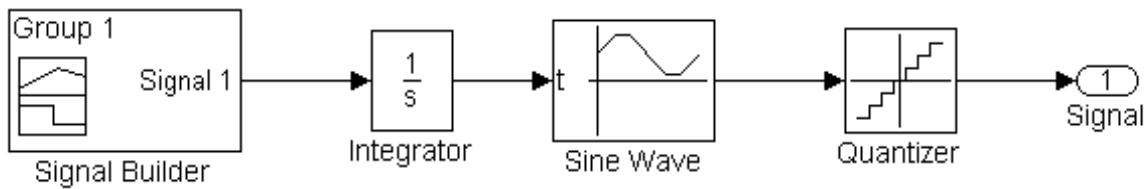


Рисунок 2.38 - Генератор импульсного сигнала с переменным расстоянием между импульсами

Для генерации сигнала используется блок Sine Wave, на выходе из которого мы получаем синусоиду с заданной амплитудой и смещением по оси ординат. В модели амплитуда и смещение синусоидального сигнала заданы равными 0,5. Для получения прямоугольного импульсного сигнала из синусоидального сигнала используется блок Quatizer с шагом квантования равным 1. Таким образом, значение синусоидального сигнала на выходе блока округляется до 0 или 1, образуя на выходе прямоугольный импульс той же частоты и амплитуды.

Для изменения частоты сигнала в блоке Sine Wave значения времени берутся из внешней переменной, которая подается на вход блока  $t$ . Производная этой переменной определяет масштаб графика синуса по временной оси. Для перехода от производной к самой переменной проводится интегрирование с помощью блока Integrator. Начальное значение в блоке Integrator задано равным нулю.

Для задания процесса изменения частоты импульсов используется блок Signal Builder, позволяющий вручную по точкам задать закон изменения выходного сигнала. Значение частоты в блоке Sine Wave подобрано таким образом, чтобы в блоке Signal Builder можно было задавать закон изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя в оборотах в минуту. Заданный в модели закон представлен на рис. 2.39.

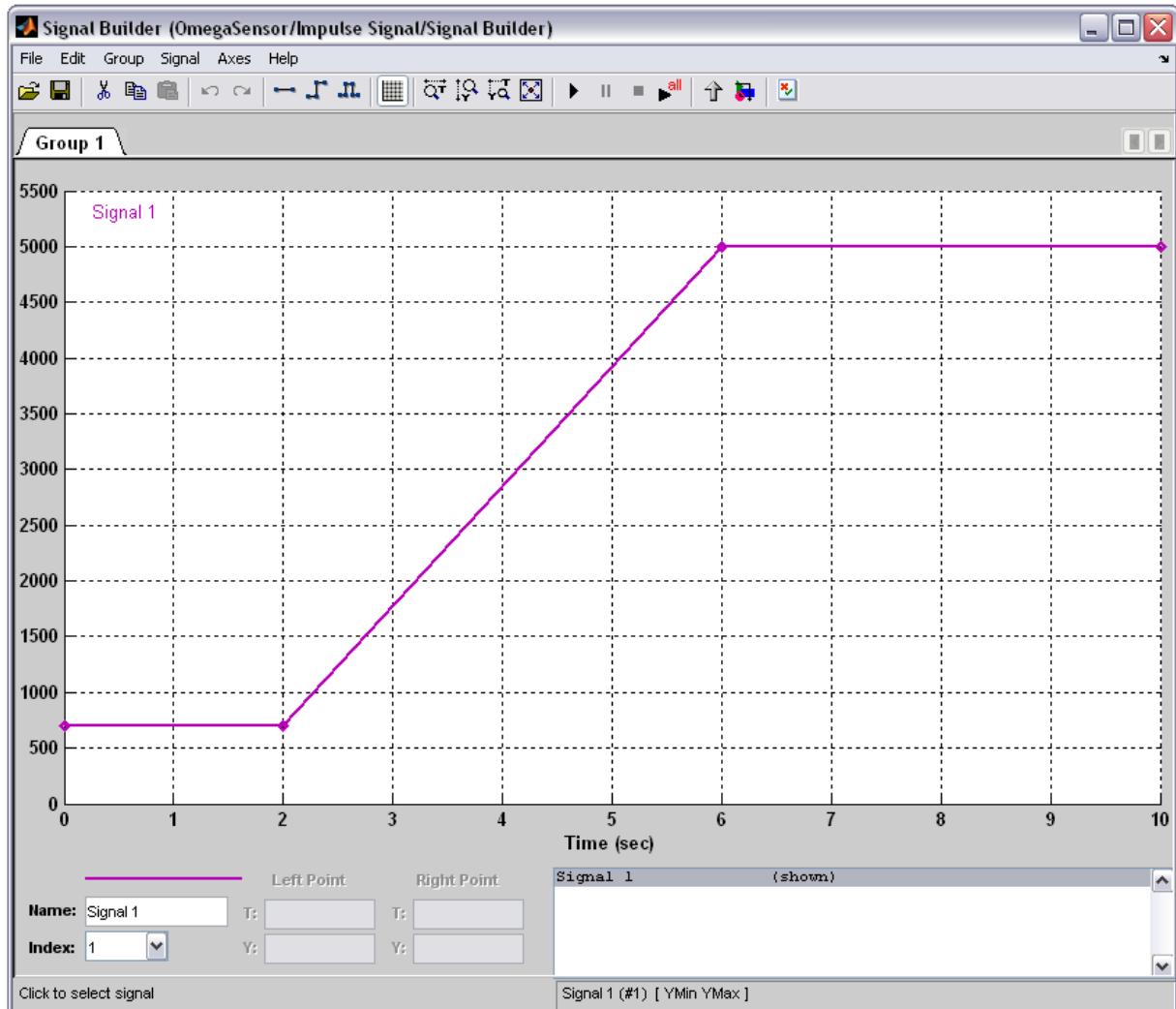


Рисунок 2.39 - Закон изменения угловой скорости коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания

0 – 2 секунды: обороты холостого хода (700 об/мин);

2 – 6 секунды: линейное увеличение с оборотов холостого хода до 5000 об/мин;

6 – 10 секунды: поддержание постоянной частоты вращения 5000 об/мин.

2). Блок TimeCounter, с помощью которого происходит замер временного интервала между двумя последовательными импульсами. Состав блока TimeCounter представлен на рис. 2.40. Состав подсистемы ImpulseCount Subsystem, входящей в блок TimeCounter, представлен на рис. 2.41.

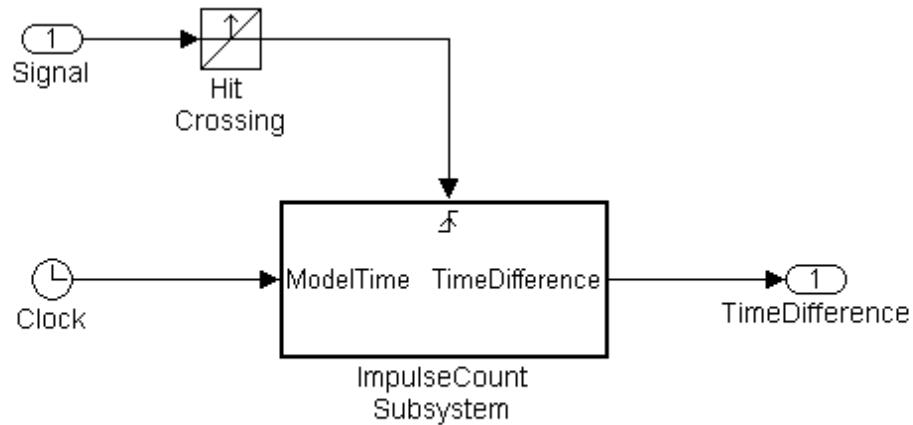


Рисунок 2.40 - Блок TimeCounter, с помощью которого происходит замер временного интервала между двумя последовательными импульсами

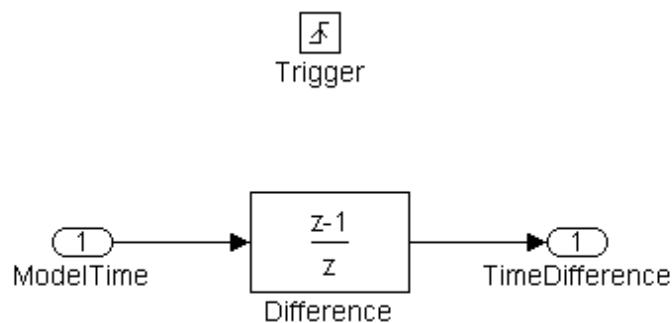


Рисунок 2.41 - Подсистема ImpulseCount Subsystem

На вход блока TimeCounter подается сгенерированный импульсный сигнал переменной частоты. С помощью блока Hit Crossing определяется момент времени, когда величина сигнала переходит через заданное значение. В модели в этом блоке задано условие пересечения снизу уровня, равного 0,5. В момент времени, когда входной сигнал равен 0,5 и имеет положительную производную, сигнал на выходе блоке становится равным 1. При несоблюдении хотя бы одного из двух условий сигнал на выходе из блока Hit Crossing равен нулю.

Далее выходной сигнал блока Hit Crossing подается на триггер подсистемы ImpulseCount Subsystem. Входной величиной для подсистемы является время симуляции. На том шаге, на котором на триггер подсистемы подается сигнал,

равный 1, подсистема вычисляет разность между значением времени на текущем шаге и на том шаге, когда подсистема последний раз активировалась (то есть в момент подачи предыдущего импульса), с помощью блока Difference. Таким образом, на выходе подсистемы ImpulseCount Subsystem получается разность значений по времени между двумя последними сгенерированными импульсами.

3). Фильтр сигнала Signal Filter. Так как частота вращения материального объекта не может меняться мгновенно, необходимо предусмотреть защиту от внезапных скачков показаний датчика. Для этого применяется сглаживание сигнала с помощью низкочастотного фильтра Баттервортса 3-го порядка с частотой среза 15 радиан в секунду.

4). Блок вычисления частоты вращения T\_imp to rpm в оборотах в минуту. На вход блока подается разница времени между двумя последними импульсами. По ее величине можно определить частоты вращения вала двигателя с использованием формулы.

$$n_{\text{дв}} = \frac{60}{n_{\text{дат.ДВС}} \cdot \Delta t}$$

где  $\Delta t$  – величина интервала времени между двумя последними импульсами (в секундах);

$n_{\text{дат.ДВС}}$  – число импульсов, получаемых с датчика за один оборот вала.

Для датчика частоты оборотов двигателя задано значение

$n_{\text{дат.ДВС}} = 60$  импульсов/оборот.

5). Ограничитель оборотов RPM Limiter. Датчик имеет определенный диапазон измерений, поэтому необходимо ограничить рассчитанную величину частоты вращения. Для этого используется блок Saturation с нижним пределом, равным частоте оборотов холостого хода (принята равной  $n_{\text{дв min}} = 700$  оборотов в минуту), и верхним пределом, равным максимальной частоте вращения (принята равной  $n_{\text{дв max}} = 5500$  оборотов в минуту).

6). Осциллографы для отображения графиков различных величин, рассчитанных при моделировании:

- сгенерированный сигнал (осциллограф Impulse/Time);
- разница времени между двумя импульсами (до и после фильтрации, осциллограф ImpulseTimeDifference);
- частота оборотов коленчатого вала двигателя (осциллограф RPM Curve).

Результаты, полученные при моделировании, приведены на рисунках 2.42, 2.43 и 2.44.

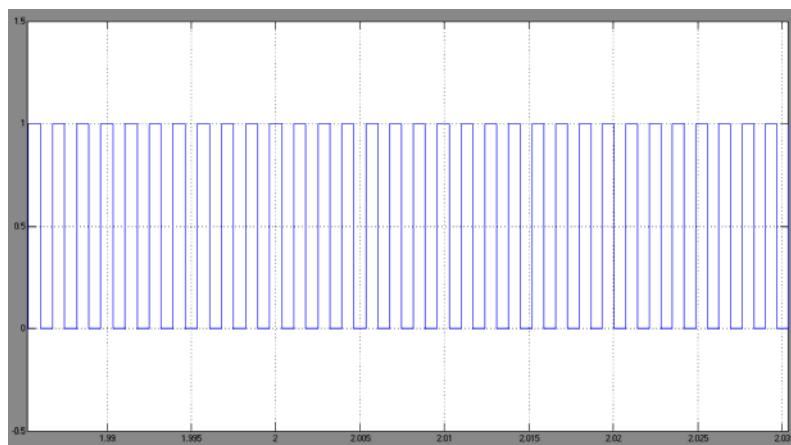


Рисунок 2.42 - Импульсный сигнал, поступающий с датчика угловой скорости (увеличенено)

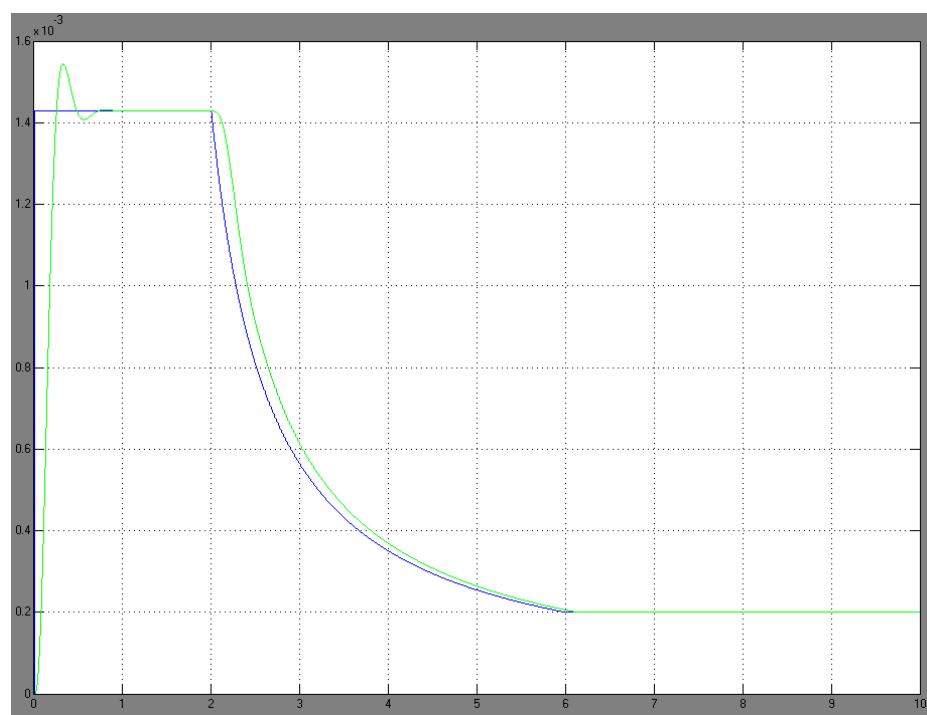
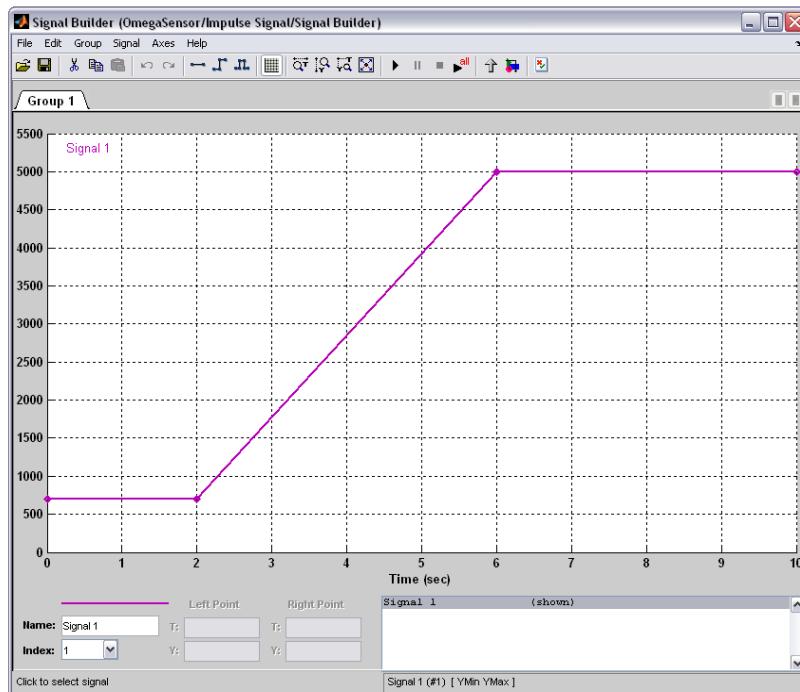
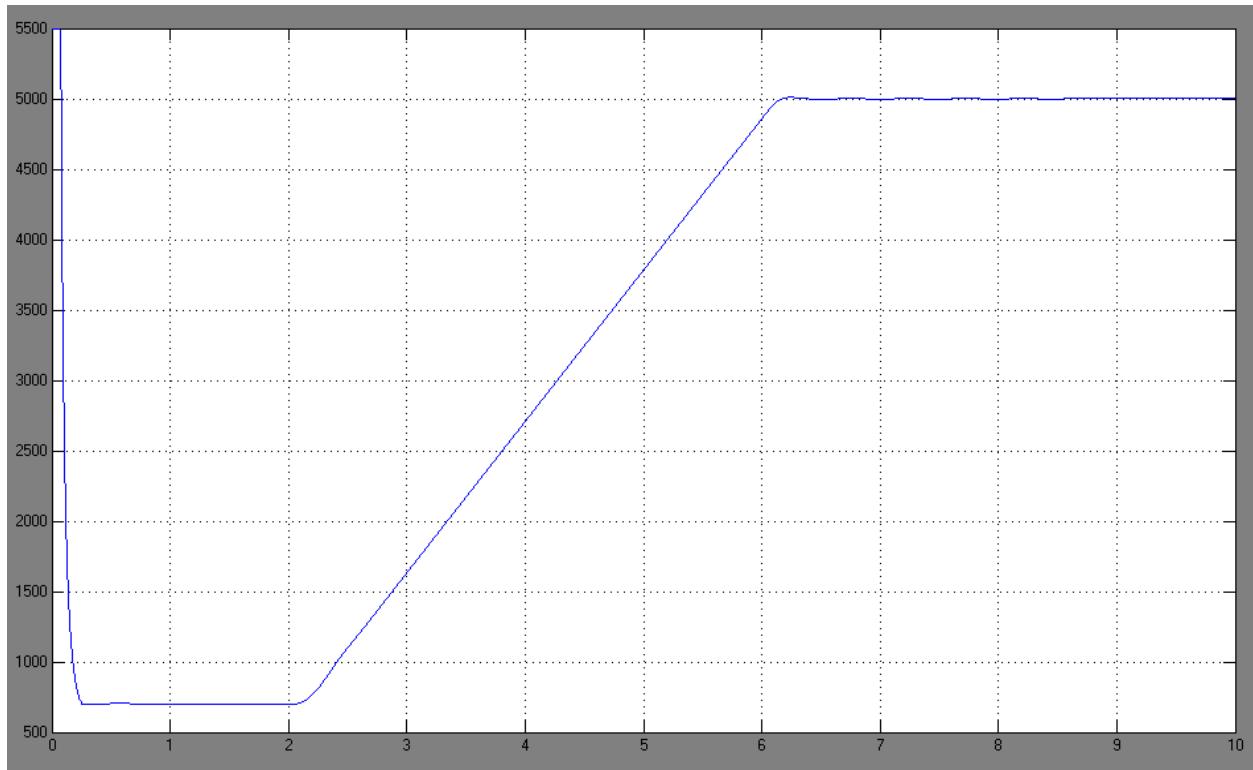


Рисунок 2.43 - Разница времени между двумя последовательными импульсами до (сверху) и после (снизу) фильтрации сигнала



(a)



(б)

Рисунок 2.44 - Заданный закон изменения частоты импульсов (а) и рассчитанная по нему зависимость частоты оборотов двигателя (б)

## 2.6.2 Математическая модель датчика положения

Датчик положения необходим для определения линейного положения того или иного элемента привода или управления. Потенциометр — регулируемый делитель электрического напряжения, представляющий собой, как правило, резистор с подвижным отводным контактом. При перемещении детали привода, связанной с датчиком, изменяется его сопротивление. При этом изменение напряжения в рабочем диапазоне датчика линейно зависит от перемещения. Зная значения напряжения в крайних положениях можно путем интерполяции по известным показаниям датчика определить текущее положение связанного с ним элемента.

Общий вид модели датчика перемещения представлен на рис. 2.45.

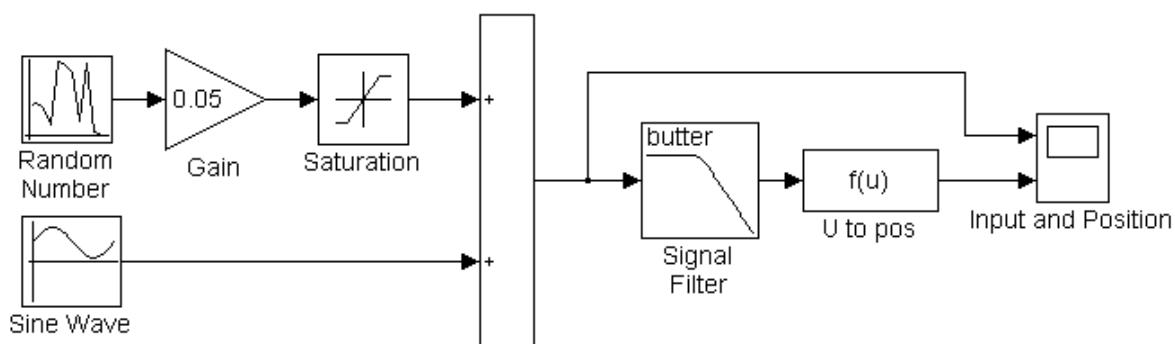


Рисунок 2.45 - Модель датчика перемещения в MATLAB/Simulink

В состав модели входят:

- Совокупность блоков, задающих закон изменения напряжения при некотором процессе. Процесс представляет собой синусоидальный закон с наложенным на него шумом. Для создания синусоидального сигнала используется блок Sine Wave. Для генерации случайного шума используется блок Random Number. Для соблюдения определенного соотношения между уровнями основного сигнала и шума используются блоки Gain и Saturation.

2) Фильтр сигнала Signal Filter. Так как положение материального объекта не может меняться мгновенно, необходимо предусмотреть защиту от внезапных скачков показаний датчика. Для этого применяется сглаживание сигнала с помощью низкочастотного фильтра Баттервортса 3-го порядка с частотой среза 15 радиан в секунду.

3) Блок вычисления положения U to pos. По показаниям датчика (напряжение U) и предельным значениям диапазона измерений (Umin и Umax) и диапазона возможных значений (равного от 0 до 1) можно определить текущее положение по формуле:

$$x = \frac{U - U_{min}}{U_{max} - U_{min}}$$

4) Осциллограф Input and Position, на который выводятся значения показаний датчика (напряжение) и положение элемента с датчиком.

Результаты, полученные при моделировании, приведены на рис. 2.46.

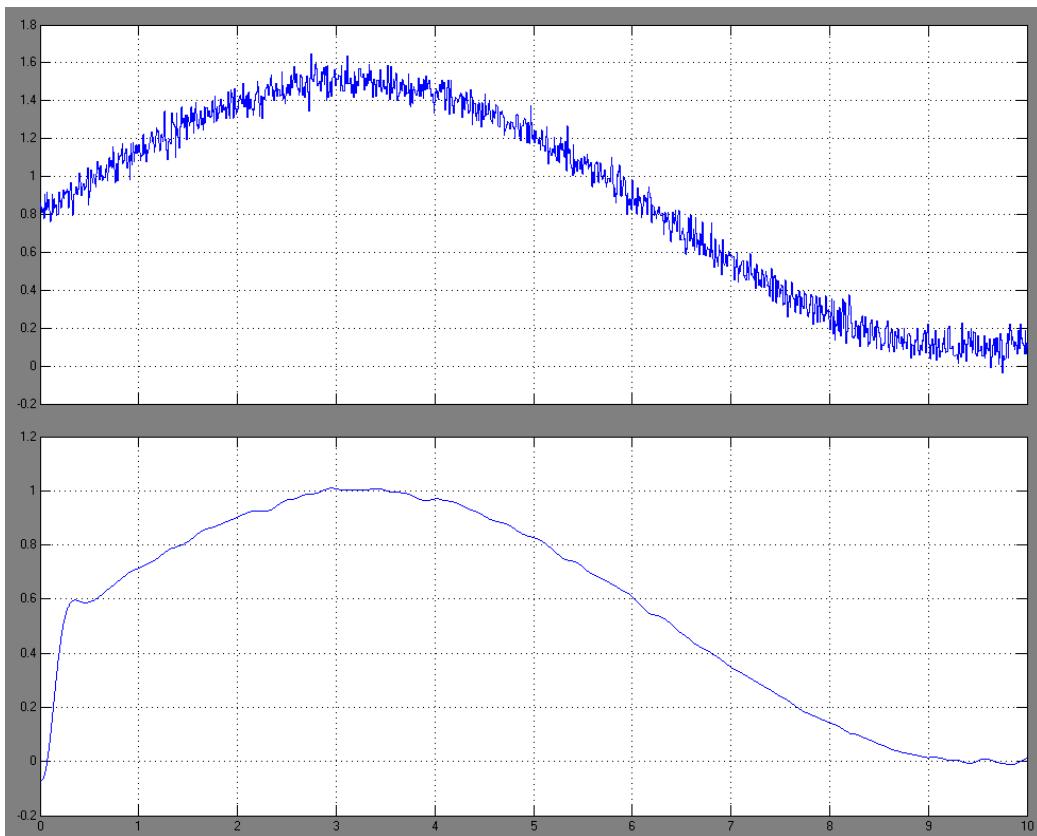


Рисунок 2.46 - Зависимость напряжения на датчике и перемещений элемента от времени

По полученным результатам в обеих моделях можно говорить о том, что модели датчиков работают верно, а фильтры сигналов работают эффективно. Полученные результаты согласуются с заданными начальными условиями.

### **2.6.3 Математическая модель объединения и согласования полученных данных**

Задача объединения и согласования состоит в получении информации с различных источников об одних и тех же событиях или процессах, нормализации данных (приведение их к однотипному виду) и суммировании с учетом веса каждого из сигналов. Этот процесс проводится для получения итогового значения тех или иных переменных, используемых в дальнейшем для принятия решений, расчета управляющих воздействий или иных целей.

В беспилотном автомобиле данные о препятствиях перед автомобилем, возможно, получить как с лидара, так и с радара или камеры наблюдения. Каждое устройство обладает определенной точностью, а также предоставляет информацию только об определенных типах объектов. Исходя из этого, для каждого типа назначаются весовые коэффициенты каждому из устройств.

В математической модели процесс объединения и согласования полученных данных может быть проведен с помощью подсистемы, принципиальная схема которой для любых входных сигналов будет одинакова. Пример подобной подсистемы приведен на рис. 2.47.

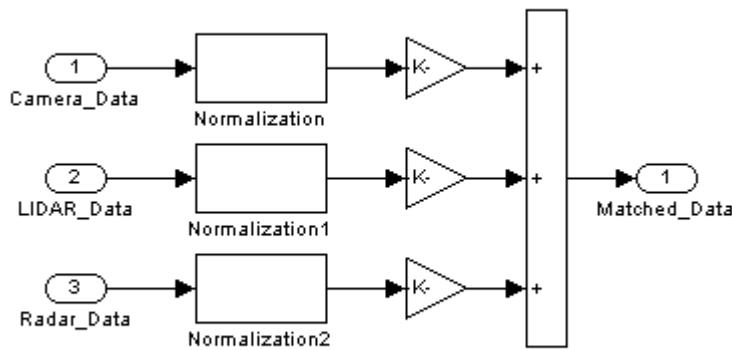


Рисунок 2.47 - Подсистема объединения и согласования данных в MATLAB/Simulink

#### 2.6.4 Математическая модель обработки изображений

Для получения информации о событиях, происходящих вокруг беспилотного автомобиля, на нем установлен ряд устройств. Одним из устройств является камера наблюдения, с которой приходит изображение того, что происходит впереди автомобиля. Изображение подлежит обработке, заключающейся в распознавании определенных объектов, таких как дорожные знаки, светофоры, разметка. Рассмотрим процесс обработки изображения с камеры на примере модели распознавания предупреждающих дорожных знаков.

В модели используется два набора шаблонов: один для обнаружения, другой для распознавания.

Для экономии вычислительных ресурсов шаблоны обнаружения имеют малое разрешение, а для каждого знака используется только один шаблон. Также, так как красный цвет является отличительной чертой предупреждающих знаков, критерием обнаружения знака в модели являются красные пиксели.

Для процесса распознавания наиболее важной характеристикой является точность. Для этого в модели используются три шаблона высокого разрешения для каждого знака. На каждом из шаблонов знак изображен со слегка измененным

положением. Критерием распознавания знака в модели являются пиксели белого цвета, позволяющие реализовать процесс распознавания.

Модель анализирует каждый кадр видеосигнала в цветовом пространстве YCbCr (Y – компонента яркости, Cb и Cr – синяя и красная цветоразностные компоненты). С помощью порогового представления яркости изображения и проведения морфологических операций с красной цветоразностной компонентой модель извлекает области кадра, содержащие пятна красного цвета. Затем в модели производится сравнение извлеченной области с шаблонами обнаружения для каждого знака. Если пятно близко к какому-либо из шаблонов обнаружения, оно помечается ограничивающим прямоугольником как потенциальный предупреждающий знак.

Модель сравнивает области, заключенные в ограничивающих прямоугольниках, на текущем и на предшествующем кадрах видеосигнала. При этом подсчитывается количество появлений каждого потенциального предупреждающего знака.

Если потенциальный знак был обнаружен на четырех кадрах подряд, модель сравнивает его с шаблонами распознавания. Если потенциальный предупреждающий знак в достаточной степени совпадает с шаблоном распознавания в течение трех кадров подряд, он считается действительным предупреждающим знаком.

Когда знак распознан, модель продолжает осуществлять его отслеживание. Однако, для экономии вычислительных ресурсов процедура распознавания больше не проводится.

При условии, что потенциальный знак был обнаружен на четырех кадрах подряд, модель использует блок Draw Shape для того, чтобы выделить знак прямоугольной рамкой желтого цвета. Когда знак распознан, он подписывается на видеозаписи с помощью блока Insert Text.

Общий вид модели представлен на рисунке 2.48.

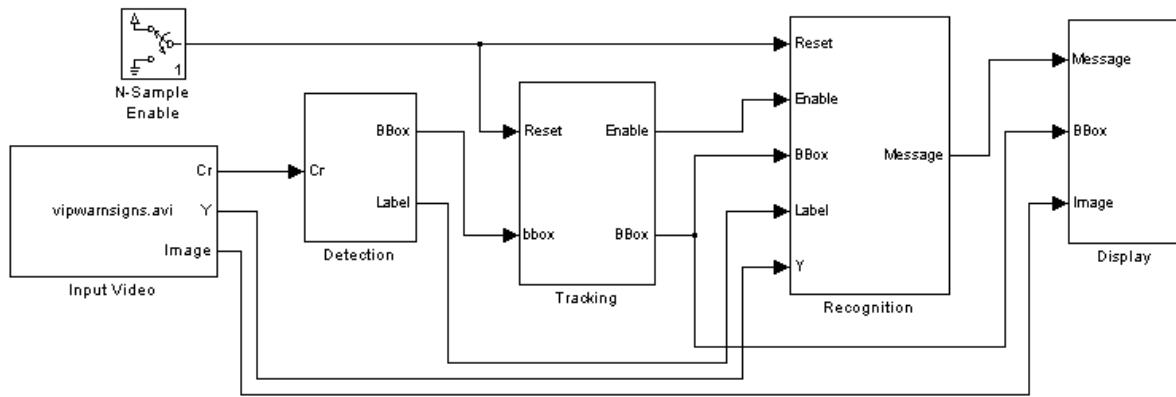


Рисунок 2.48 - Обработка изображений в MATLAB/Simulink

В модели используются:

- 1) блок Input Video, который отвечает за получение и обработку видеосигнала. Содержимое блока представлено на рисунке 2.49.

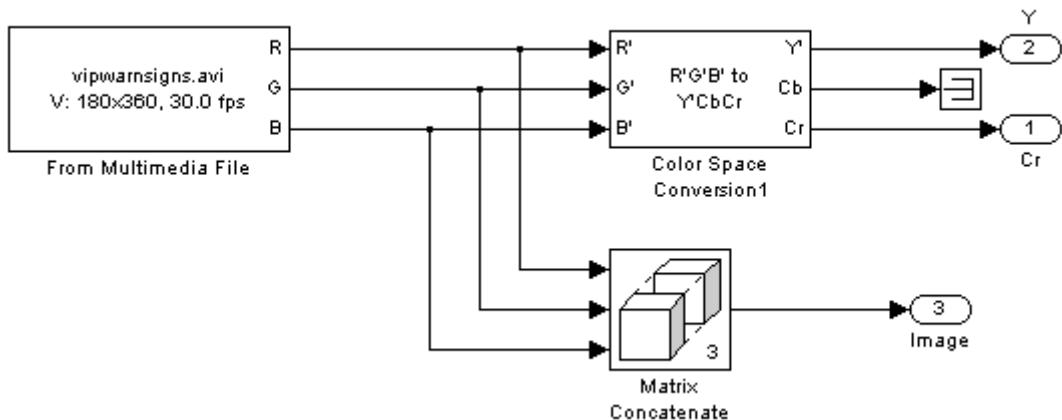


Рисунок 2.49 - Блок Input Video в MATLAB/Simulink

- 2) блок Detection, в котором происходит сравнение с шаблонами обнаружения и фиксирование потенциальных предупреждающих знаков. Содержимое блока представлено на рисунке 2.50.

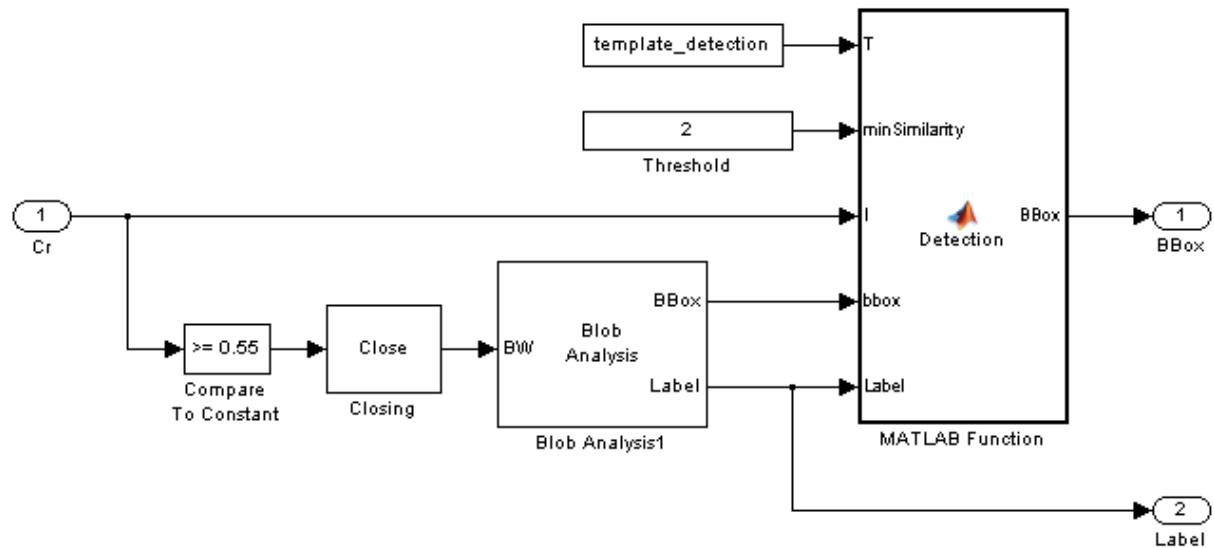


Рисунок 2.50 Блок Detection в MATLAB/Simulink

3) блок Tracking, в котором осуществляется отслеживание обнаруженных знаков (потенциальных и действительных). Содержимое блока представлено на рисунке 2.51.

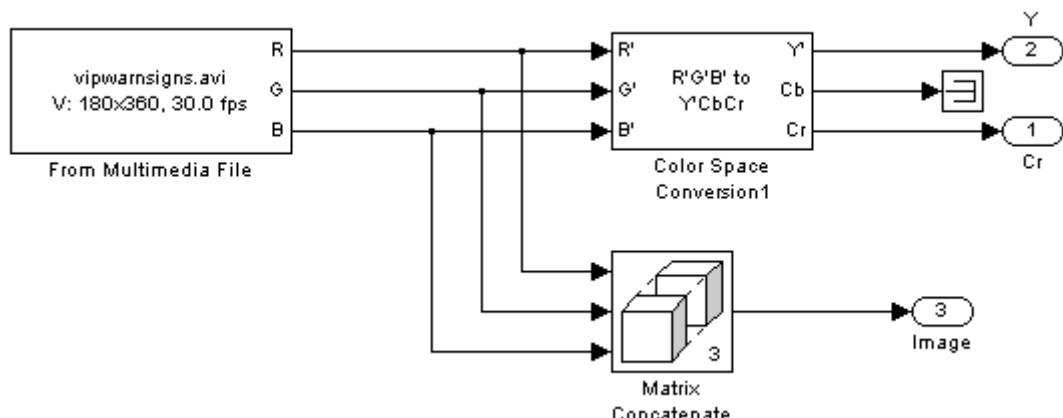


Рисунок 2.51 - Блок Tracking в MATLAB/Simulink

4) блок Recognition, в котором происходит сравнение потенциального знака с шаблонами распознавания. Содержимое блока представлено на рисунке 2.52.

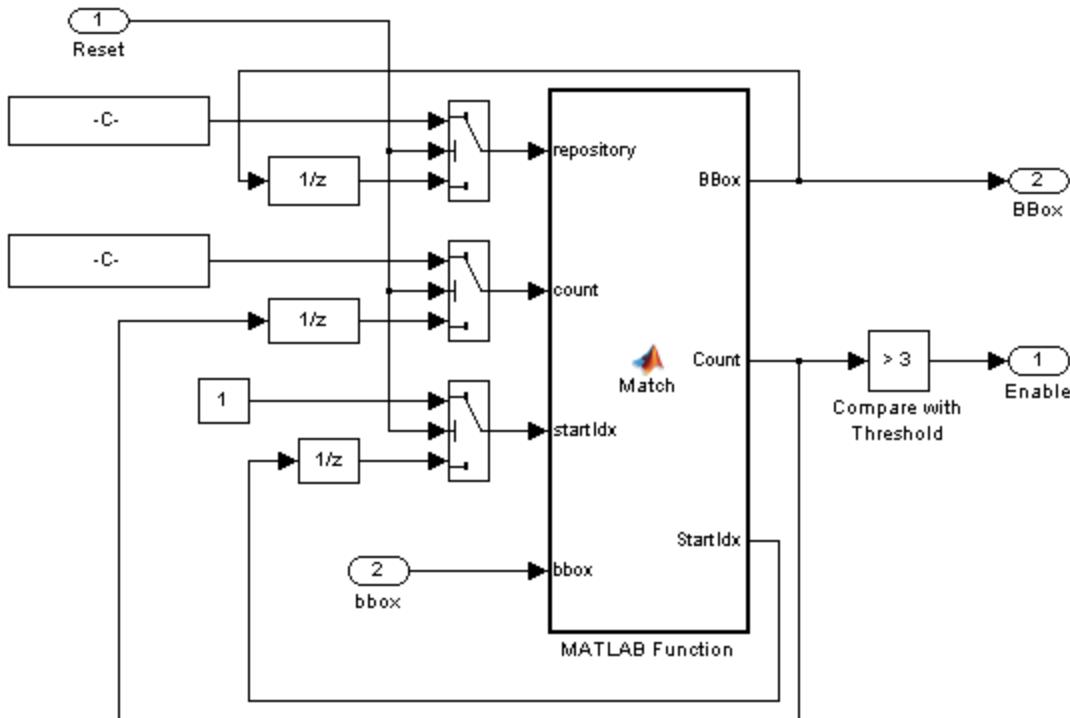


Рисунок 2.52 - Блок Recognition в MATLAB/Simulink

5) блок Display, осуществляющий вывод обработанного изображения.  
Содержимое блока представлено на рисунке 2.53.

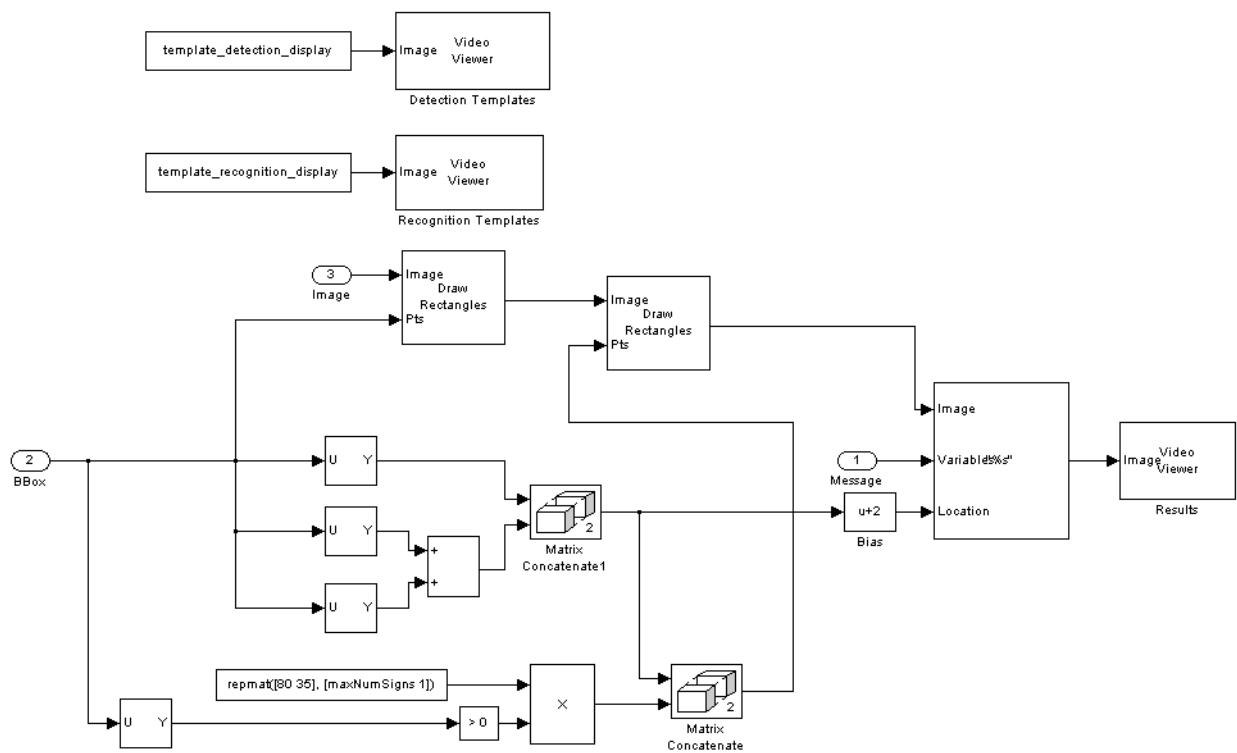


Рисунок 2.53 - Блок Display в MATLAB/Simulink

## 2.4 Выводы

1. На основе современных положений теории движения автомобиля разработана математическая модель, которая позволяет прогнозировать характеристики криволинейного движения беспилотного АТС. Особенностью предложенной модели является возможность учета задержки сигнала управляющего воздействия при криволинейном движении беспилотного АТС.
2. На основе подхода, принятого при создании математической модели движения беспилотного АТС, разработан метод математического моделирования движения беспилотных колесных транспортных средств по недеформируемым опорным поверхностям с учетом особенностей регистрирующих, вычислительных и исполнительных устройств. Особенность метода заключается в возможности изменения времени задержки сигнала управляющего воздействия на рулевой механизм без существенных доработок исходной математической модели движения.
3. Разработанная математическая модель движения беспилотного АТС и метод математического моделирования движения беспилотных колесных транспортных средств являются составляющими достижения цели диссертационного исследования при прогнозировании характеристик криволинейного движения на этапе проектирования беспилотного АТС, а также при оценке безопасности движения по заданным маршрутам.

## ГЛАВА 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АТС

### 3.1 Методика проведения имитационных испытаний по оценке маневренности, управляемости и устойчивости беспилотного АТС

В качестве типового манёвра для исследования характеристик криволинейного движения беспилотного АТС в соответствии с ГОСТ Р 52302-2004 «Автомобильные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний» выбран маневр «Переставка  $S_{II} = 20$  м» [39].

Данный нормативный документ, а также ГОСТ Р 52280-2004, предусматривают различные испытания по оценке управляемости и устойчивости АТС: установление предельного значения усилия на рулевом колесе, стабилизацию прямолинейного движения после движения по радиусу, начало установившегося кругового движения после рывка рулём, скорость прохождения размеченных участков с различными радиусами поворота и др. Выбранный тип испытания «Переставка  $S_{II} = 20$  м» позволяет оценить показатели устойчивости и управляемости.

Порядок проведения теоретических исследований также соответствует [39], но с учётом ряда особенностей, обусловленных программной реализацией математических моделей.

Закон управления поворотом задающего колеса  $\theta_p$  представлен на рис. 3.1. При проведении теоретических исследований по выполнению манёвра «Переставка» для беспилотного АТС и каждой скорости уточнялись максимальные углы поворота задающего (рулевого) колеса, момент времени, соответствующий началу управляющего воздействия, а также время задержки сигнала управляющего воздействия обусловленное характеристикой системы управления беспилотным АТС.

Оценочным параметром для данного манёвра является его предельно возможная скорость выполнения, при соответствующей величине задержки сигнала управляющего воздействия. Поскольку в случае «Переставки» судить о том, осуществлён манёвр или нет по каким-либо косвенным признакам: параметрам, графикам и т.п. достаточно трудно, то в анимационном ролике в соответствии с ГОСТ Р 52302-2004 для данного типа автомобилей была произведена разметка коридора движения. Закон управления и скорость движения корректировались по возможности ТС двигаться, не выходя за границы размеченного коридора, о чём можно было судить визуально после запуска анимации.

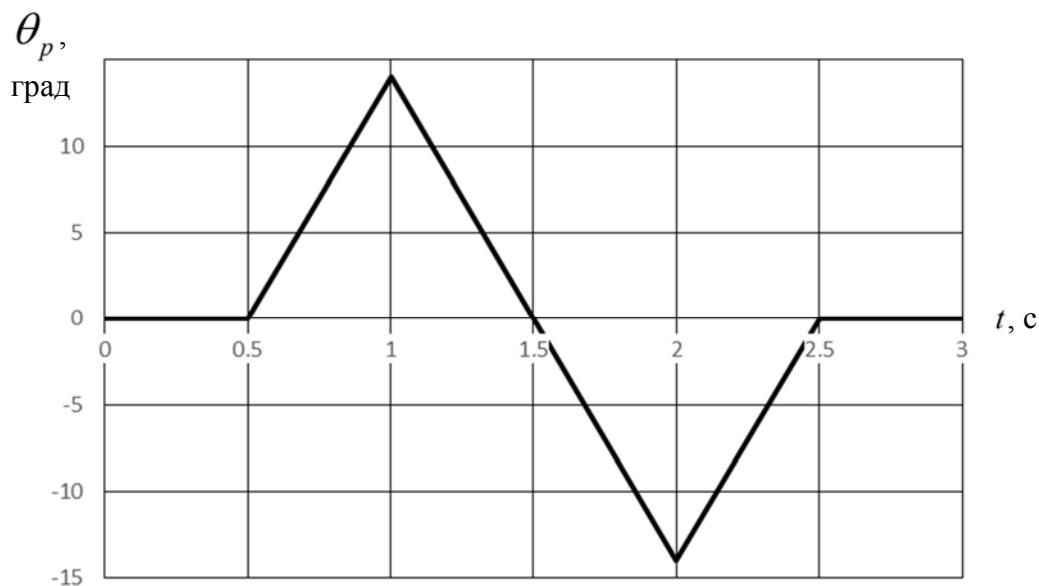


Рисунок 3.1 – Закон управления движением при выполнении манёвра «Переставка»

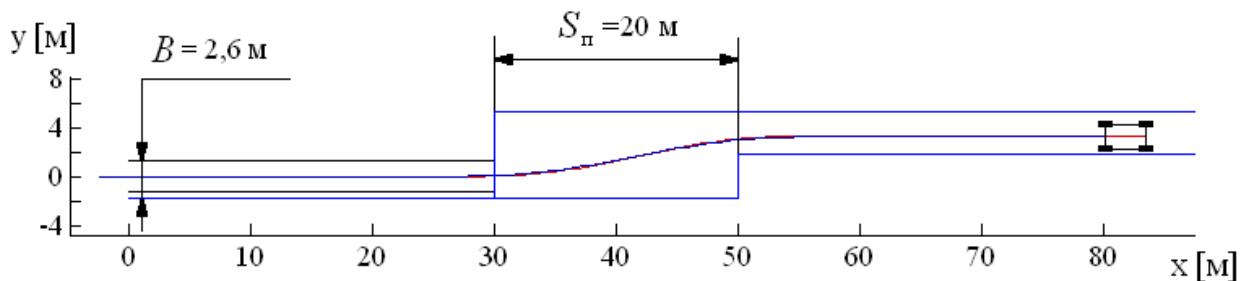


Рисунок 3.2 – Вид коридора движения при выполнении манёвра «Переставка  $S_\pi = 20 \text{ м}$ »

Поворот колес начинался при пересечении автомобилем границы начала коридора переставки ( $x = 30$  м рис. 3.2). Время движения  $t = 3$  с. До максимального значения поворот рулевого колеса осуществлялся за 0,5 с. Время задержки увеличивалось до момента выхода беспилотного АТС из коридора движения, что позволило определить максимальную скорость выполнения манёвра с соответствующей задержкой управляющего воздействия.

### **3.2 Результаты теоретических исследований динамики беспилотного АТС при выполнении типового маневра на опорном основании с высокими сцепными свойствами**

Моделирование типового манёвра «Переставка  $s = 20$  м». Под термином «опорное основание с высокими сцепными свойствами» понимается ровная горизонтальная недеформируемая опорная поверхность с коэффициентом сцепления - 0,8.

На рис.3.3 представлен график изменения скорости беспилотного АТС в процессе выполнения маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20$  м».

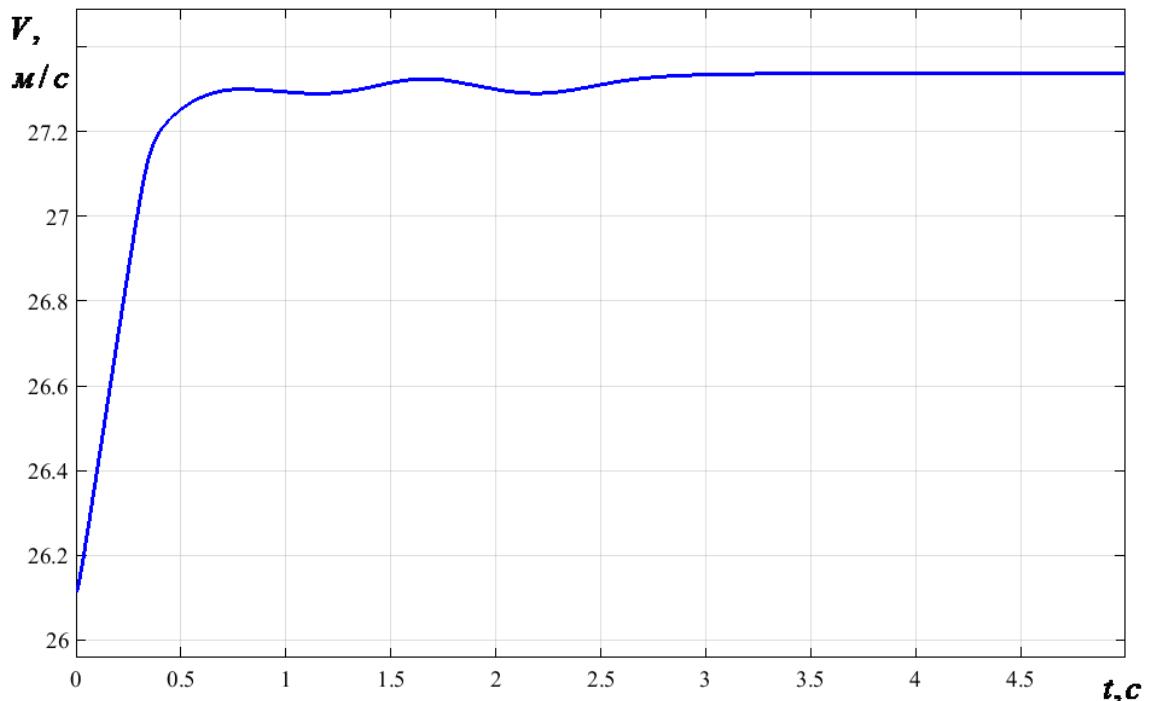


Рисунок 3.3 - Скорость движения беспилотного АТС  
Максимальная начальная скорость – 94 км/ч

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.3 можно сделать вывод о том, что беспилотное АТС за первые 0,5 секунды движения разогналось с начальной скорости  $V_0 = 94 \text{ км/ч}$  до  $97 \text{ км/ч}$  и в дальнейшем скорость поддерживалась.

На рис.3.4 представлен график изменения бокового ускорения беспилотного АТС в процессе выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

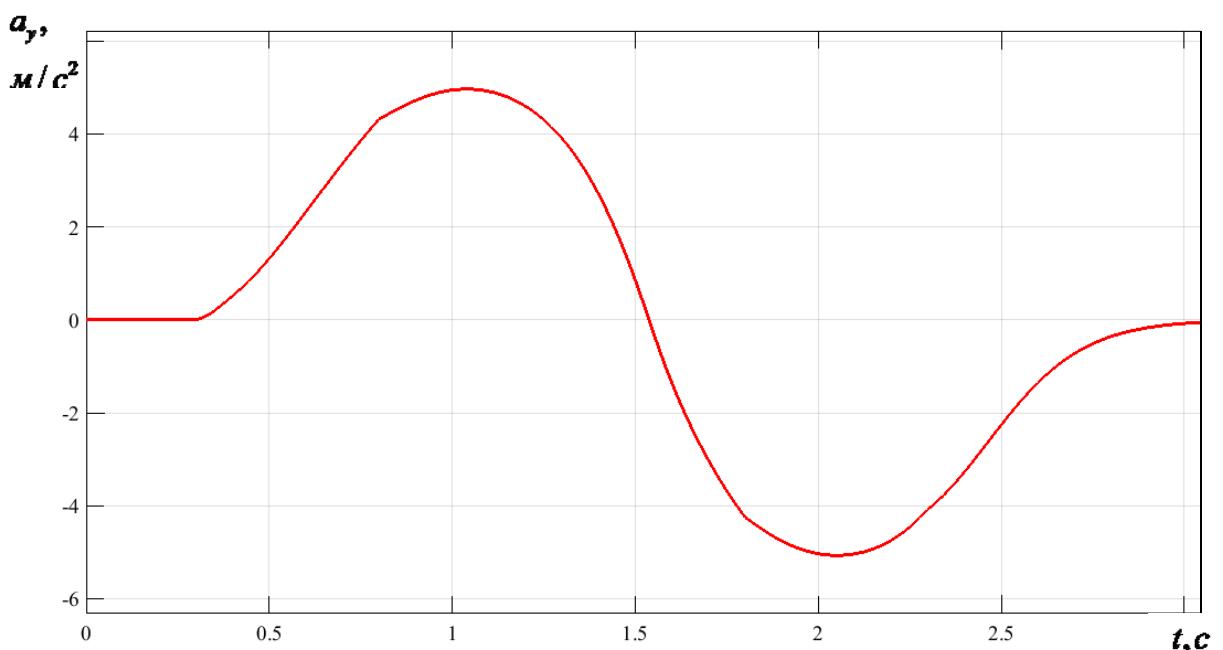


Рисунок 3.4 - Боковое ускорение центра масс беспилотного АТС

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.4 можно сделать вывод о том, что максимум бокового ускорения  $5 \text{ м/с}^2$  достигается в моменты смены направления движения беспилотного АТС.

На рис. 3.5 представлен график изменения угловой скорости корпуса беспилотного АТС относительно вертикальной оси в процессе выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

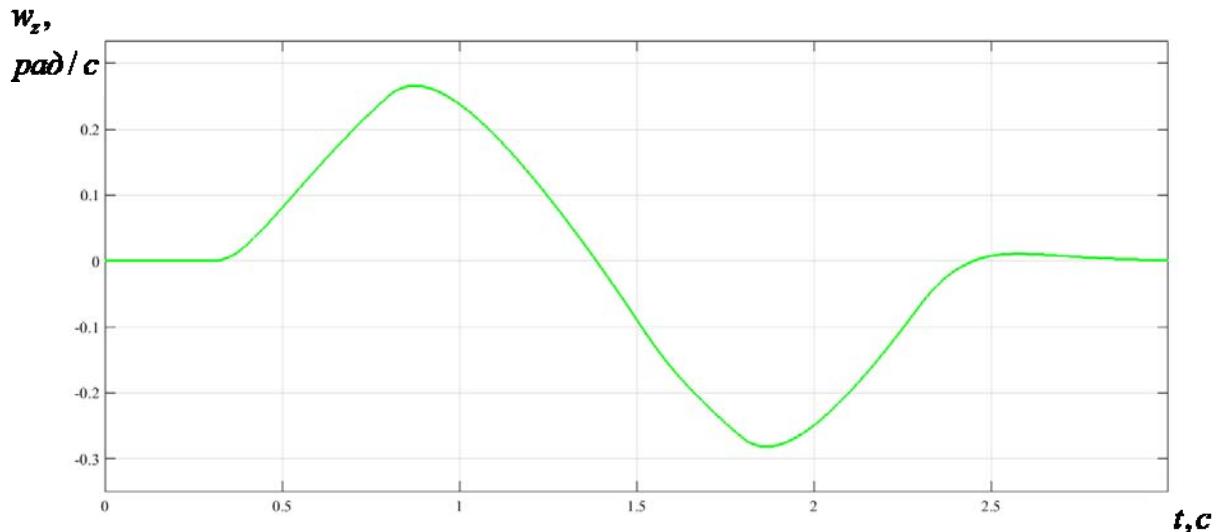


Рисунок 3.5 - Угловая скорость поворота корпуса беспилотного АТС

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.5 можно сделать вывод о том, что максимум угловой скорости поворота корпуса беспилотного АТС  $0,26 \text{ rad/s}$  достигается в моменты смены направления движения беспилотного АТС.

На рис.3.6 представлен график изменения степени использования мощности двигателя беспилотного АТС в процессе выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

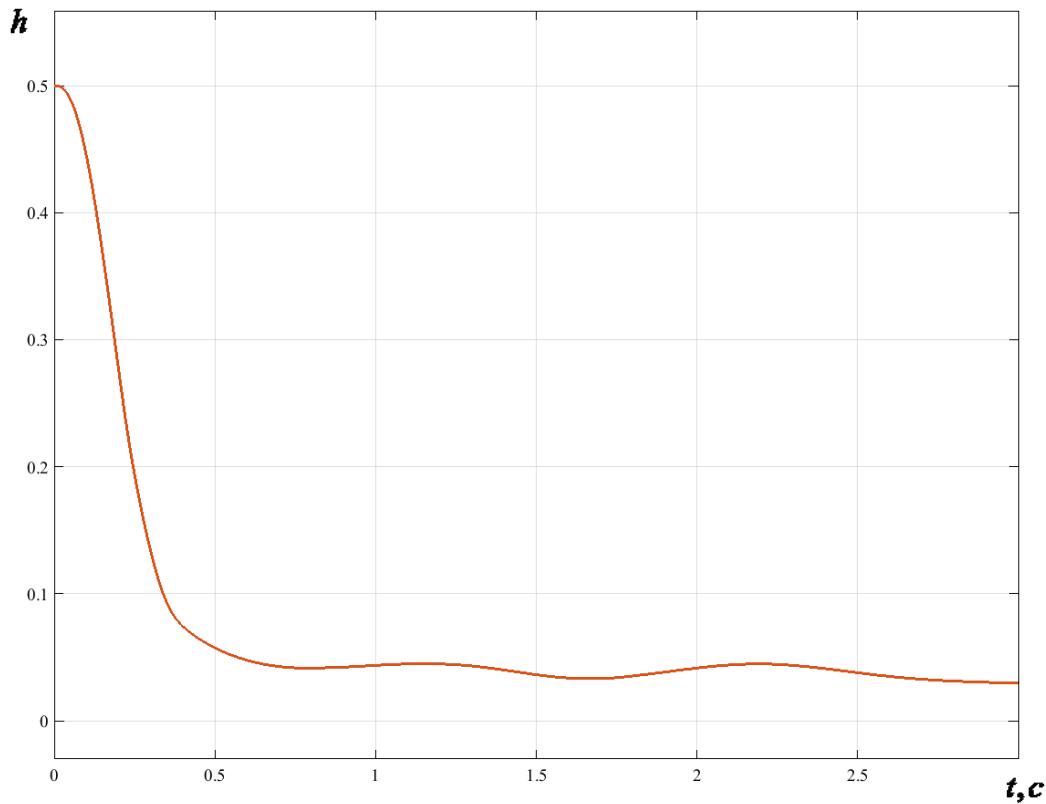


Рисунок 3.6 – Степень использования мощности двигателя беспилотного АТС

Для поддержания постоянной скорости при выполнении маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20\text{м}$ », требуется незначительная часть мощности энергетической установки (см. рис. 3.6).

Закон управления движением беспилотного АТС, представленный на рис. 3.7, позволил успешно выполнить маневр «Переставка  $S_{\Pi} = 20\text{м}$ » на максимальной скорости  $V_{\max} = 94\text{км/ч}$ .

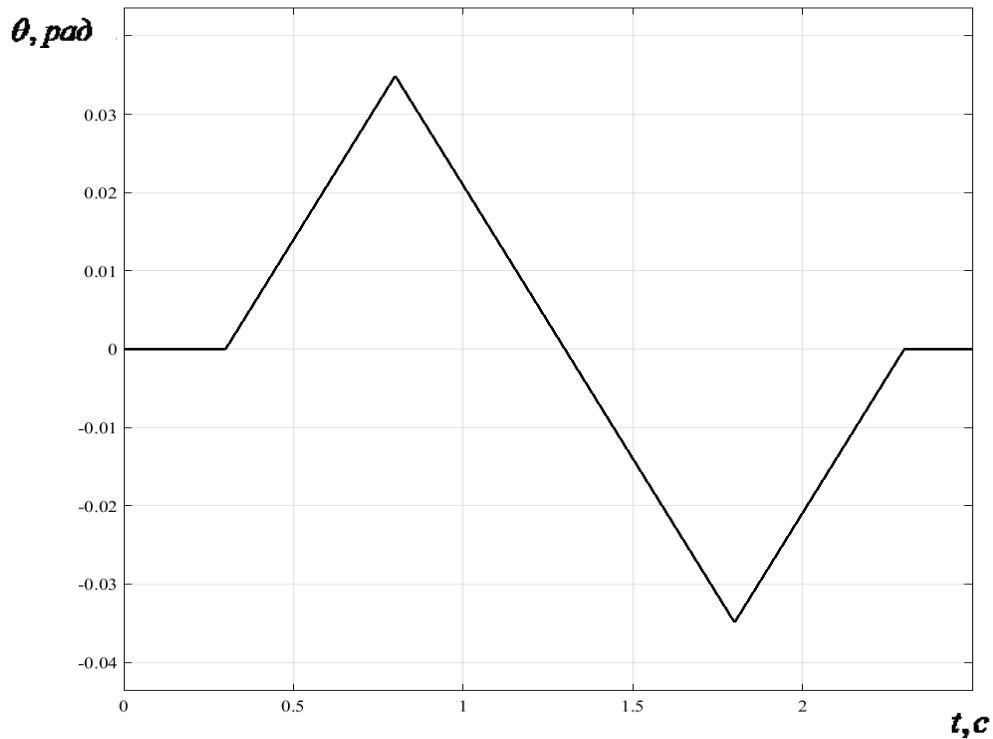


Рисунок 3.7 - Закон управления движением беспилотного АТС при выполнении манёвра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ »

На рис. 3.8 представлены графики изменения боковых реакций колес при выполнении маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ » беспилотным АТС на максимальной скорости  $V_{\max} = 94\text{км/ч}$ .

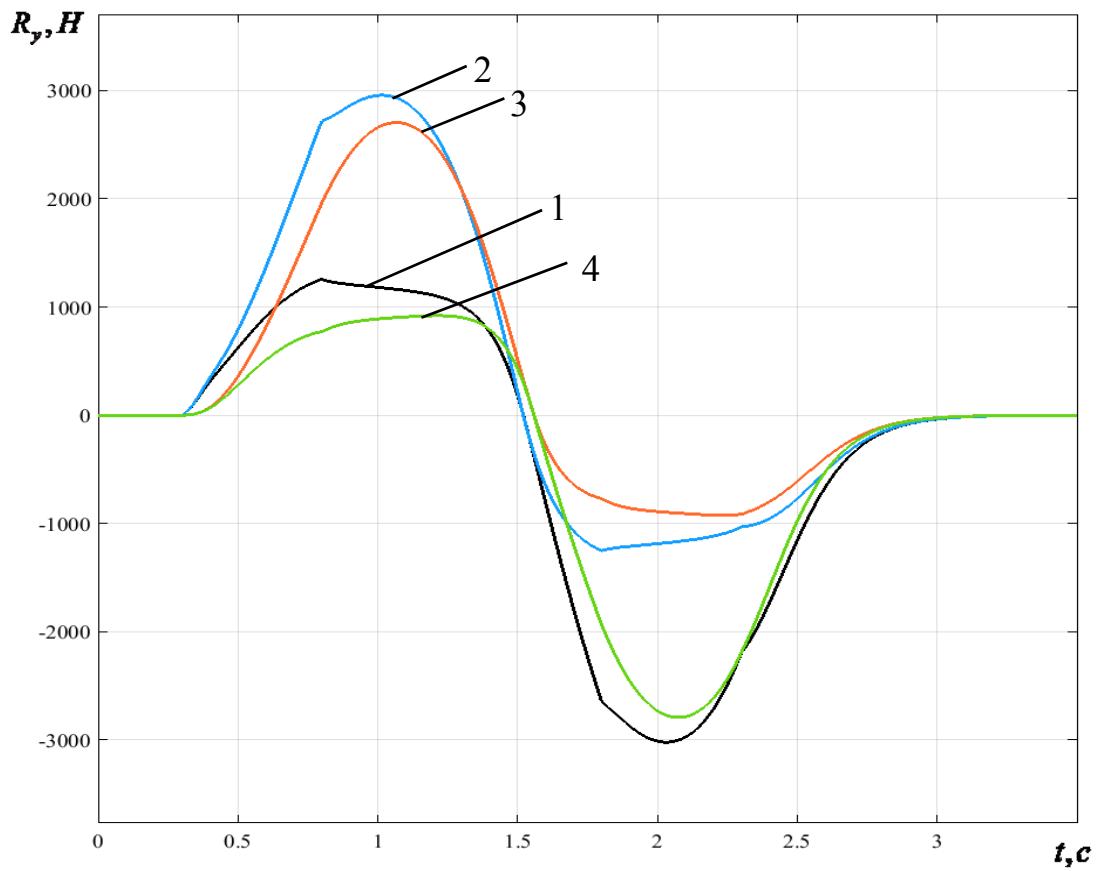


Рисунок 3.8 - Боковые реакции на колесах беспилотного АТС

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.8 можно сделать вывод о том, что в процессе выполнения маневра наиболее нагруженными боковой силой  $R_y = 3000 \text{ H}$  являются колеса 1 и 2. Максимум боковой силы достигается в моменты смены направления движения беспилотного АТС.

На рис. 3.9 представлены графики изменения нормальных реакций колес беспилотного АТС в процессе выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

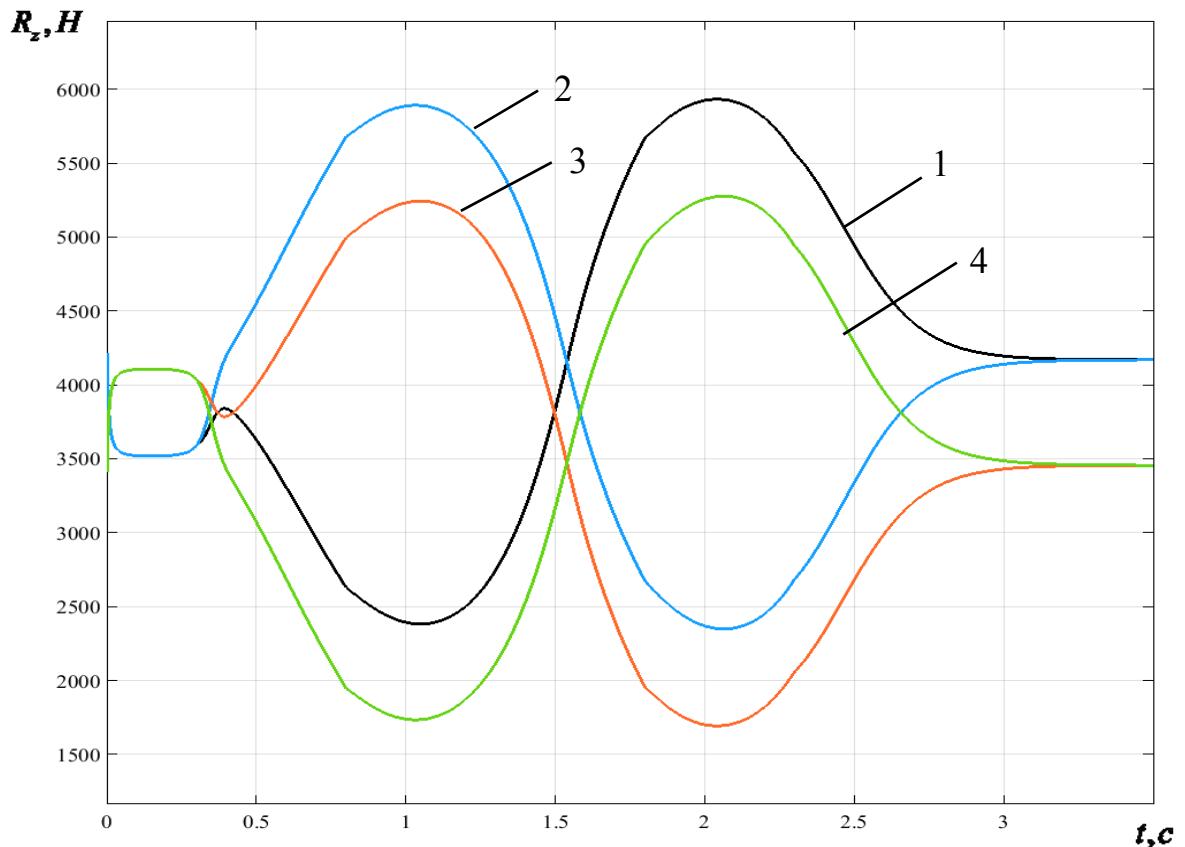


Рисунок 3.9 – Нормальные реакции колес беспилотного АТС

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.9, можно сделать вывод о том, что в процессе выполнения маневра максимальное значение нормальной реакции  $R_z = 5850 \text{ H}$  на колесах 2 и 1 достигается на 1,1 и 2,1 секунде расчета.

На рис. 3.10 представлены угловые скорости вращения колес беспилотного АТС при выполнении маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

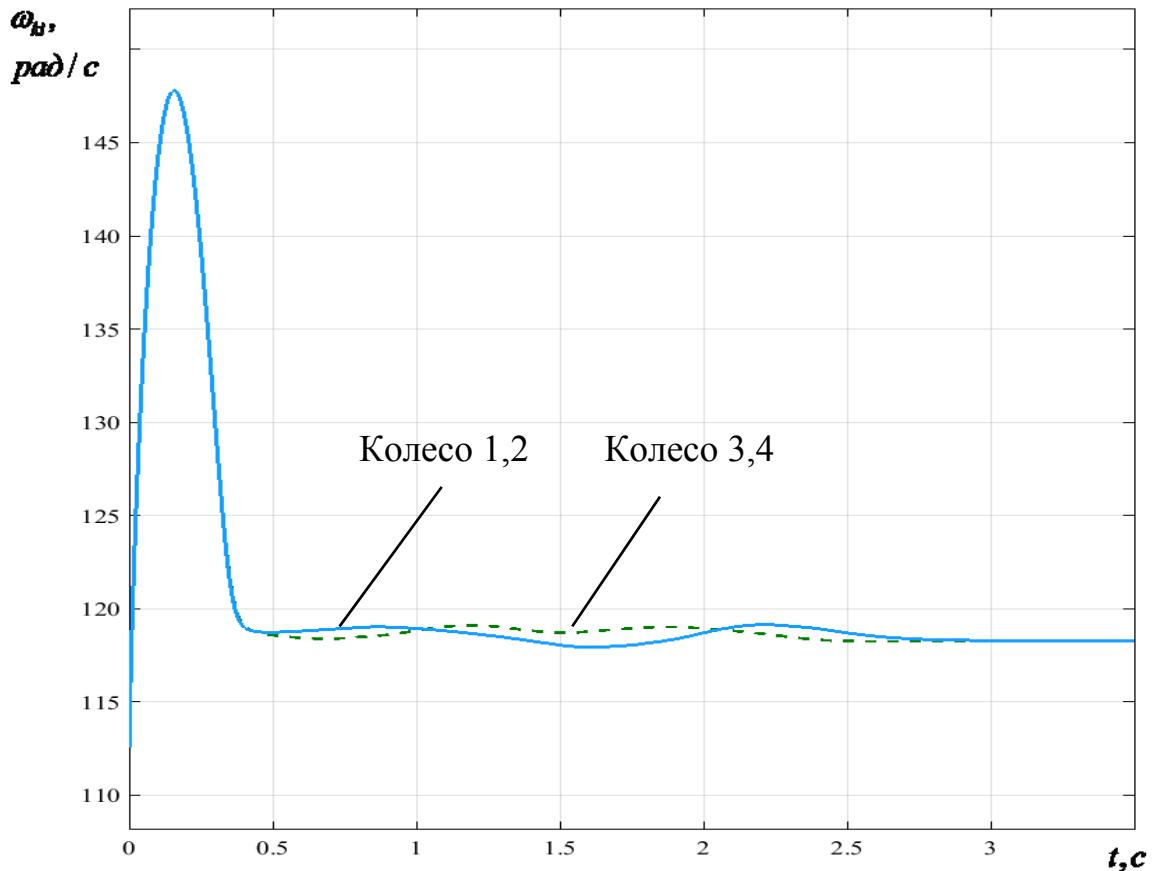


Рисунок 3.10 – Угловые скорости вращения колес беспилотного АТС

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.10 можно сделать вывод о том, что в процессе выполнения маневра разница в величинах значений угловых скоростей вращения колес не превышает 3%. Это свидетельствует о том, что маневр был выполнен без наступления критических режимов по скольжению.

На рис. 3.11 представлены траектории выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ » с временем задержки управляющего сигнала 0 с рис.3.3 (а) и временем задержки управляющего сигнала 0,5 с рис.3.3 (б).

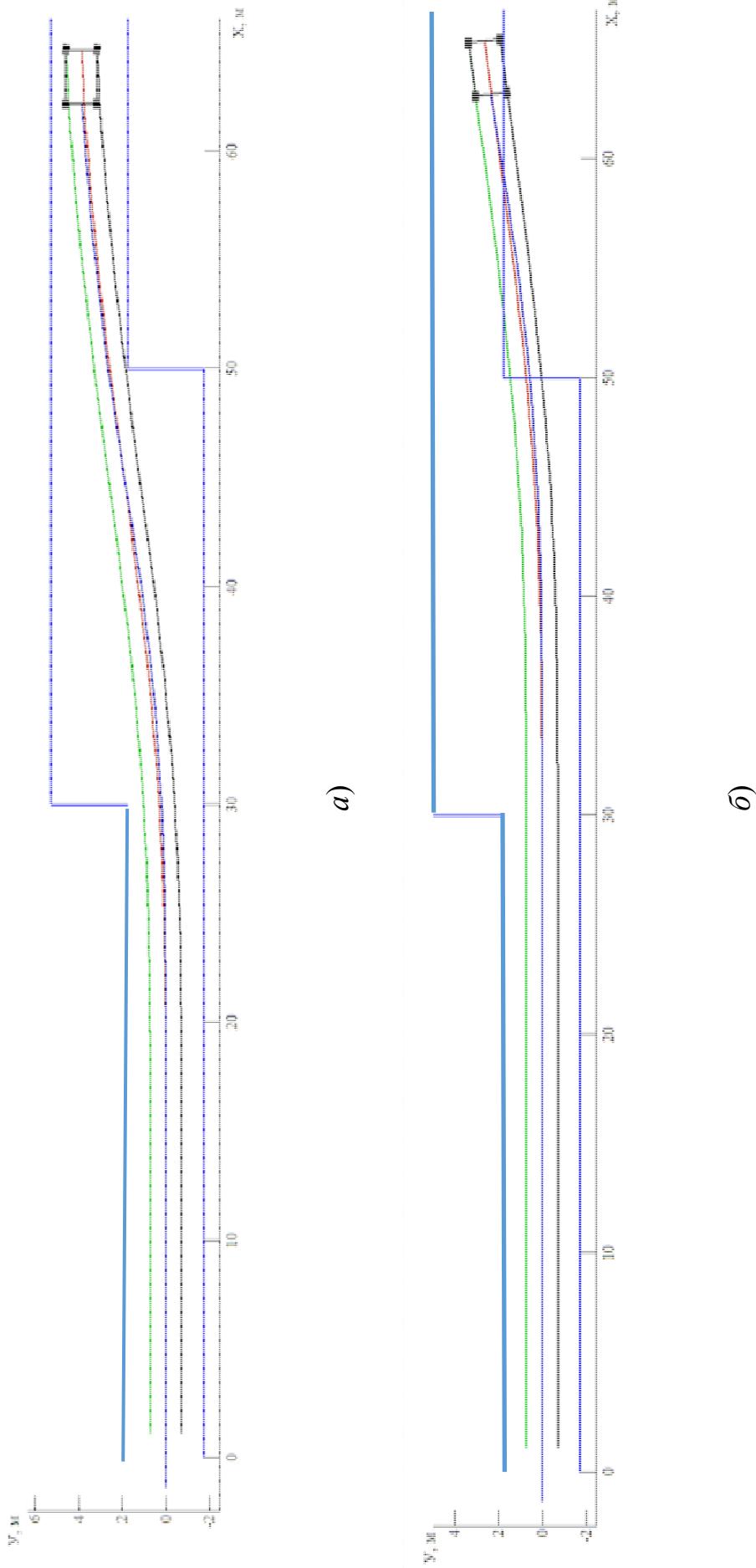


Рисунок 3.11 – Траектория выполнения маневра «Переставка» на опорном основании с высокими сцепными свойствами: *a* - время задержки управляющего сигнала 0 с; *b* – время задержки управляющего сигнала 0,5 с.

Попытка выполнить маневр «Переставка» с такими же управляющими воздействиями, в таком же скоростном режиме и временем задержки сигнала управляющего воздействия 0,5 с, привела к тому, что беспилотное АТС не выполнило маневр.

Для беспилотного АТС на базе автомобиля LADA-Калина были определены максимальные скорости безопасного выполнения маневра «Переставка  $s=20$  м» на опорном основании – «асфальт» (максимальный коэффициент сцепления – 0,8) с различным временем задержки сигнала управляющего воздействия, результаты представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Максимальные скорости безопасного выполнения маневра «Переставка  $s=20$  м» на опорном основании с высокими сцепными свойствами при различном времени задержки сигнала управляющего воздействия.

$V_{\max}$ , км / ч	$\Delta t$ , с
94	0,02
90	0,03
80	0,16
70	0,29
60	0,37
50	0,54
40	0,66
30	0,71
20	0,84
10	0,89

Таким образом, по результатам имитационного математического моделирования были получены значения задержки сигналов управляющего воздействия для различных скоростей успешного выполнения маневра «Переставка  $s=20$  м».

На рис. 3.12 представлена графическая зависимость максимальной скорости безопасного выполнения маневра «Переставка  $s=20$  м» от времени задержки сигнала управляющего воздействия  $\Delta t$ .

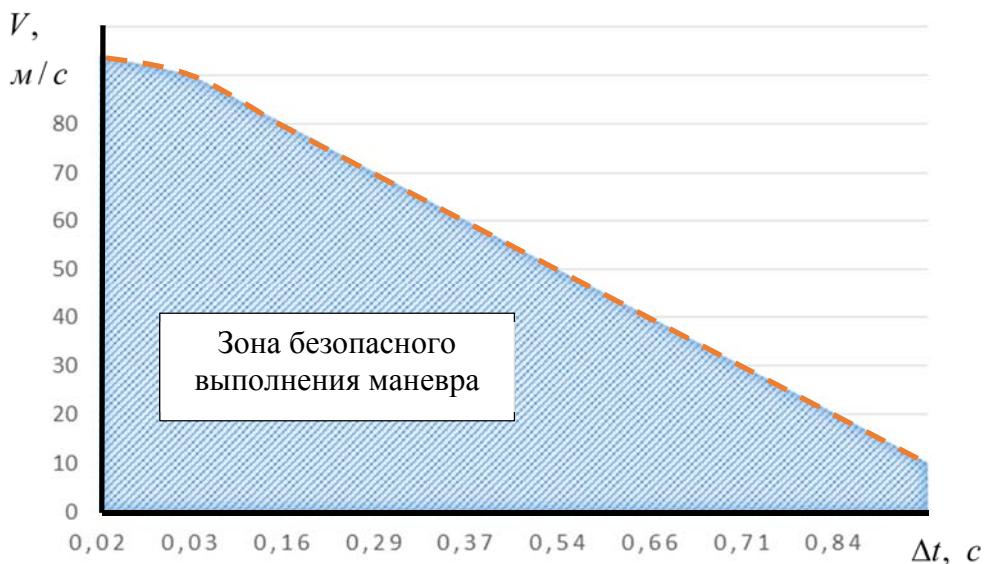


Рисунок 3.12 – Зависимость максимальной скорости безопасного выполнения маневра «Переставка  $s=20$  м» от времени задержки сигнала управляющего воздействия  $\Delta t$ , опорное основание с высокими сцепными свойствами

### 3.3 Результаты теоретических исследований динамики беспилотного АТС при выполнении типового маневра на опорном основании с низкими сцепными свойствами

Моделирование типового манёвра «Переставка  $s=20$  м». Под термином «опорное основание с низкими сцепными свойствами» понимается ровная горизонтальная недеформируемая опорная поверхность с коэффициентом сцепления - 0,3.

На рис.3.13 представлен график изменения скорости беспилотного АТС в процессе выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

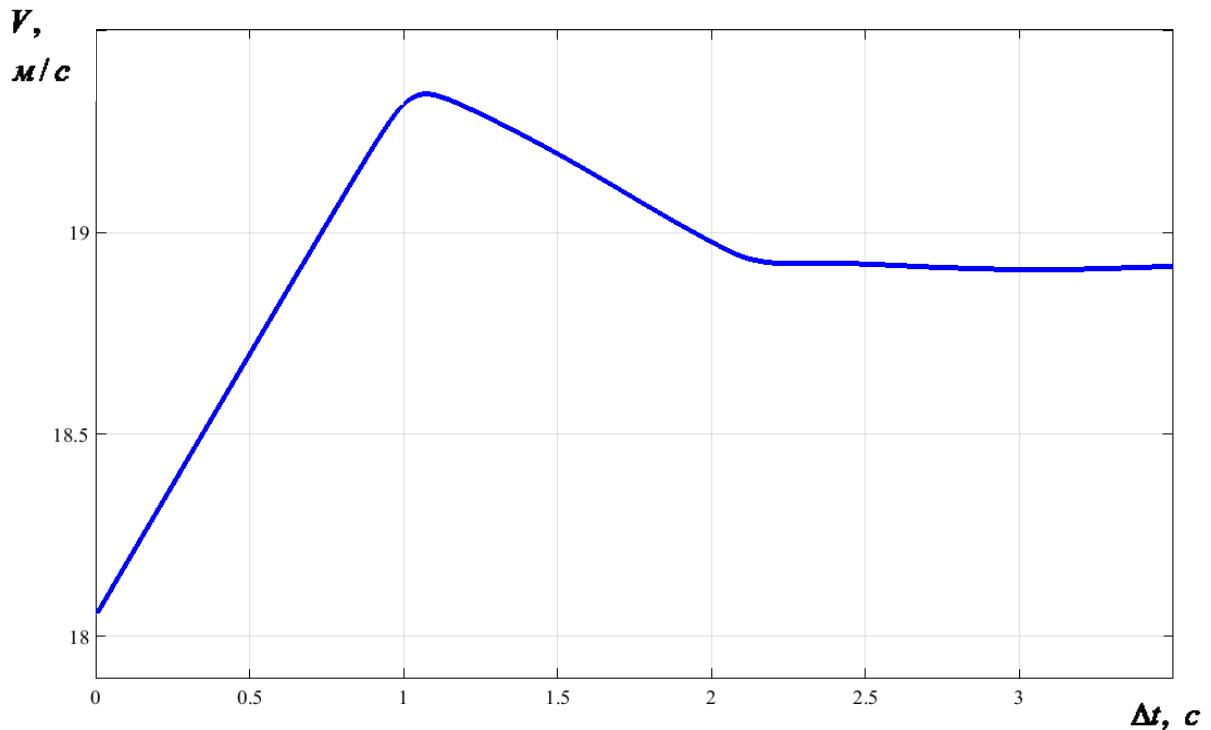


Рисунок 3.13 - Скорость движения беспилотного АТС  
Максимальная начальная скорость – 65 км/ч

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.13 можно сделать вывод о том, что беспилотное АТС за первую секунду движения разогналось с начальной скорости  $V_0 = 65 \text{ км/ч}$  до  $68 \text{ км/ч}$  и в дальнейшем скорость поддерживалась.

На рис.3.14 представлен график изменения бокового ускорения беспилотного АТС в процессе выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

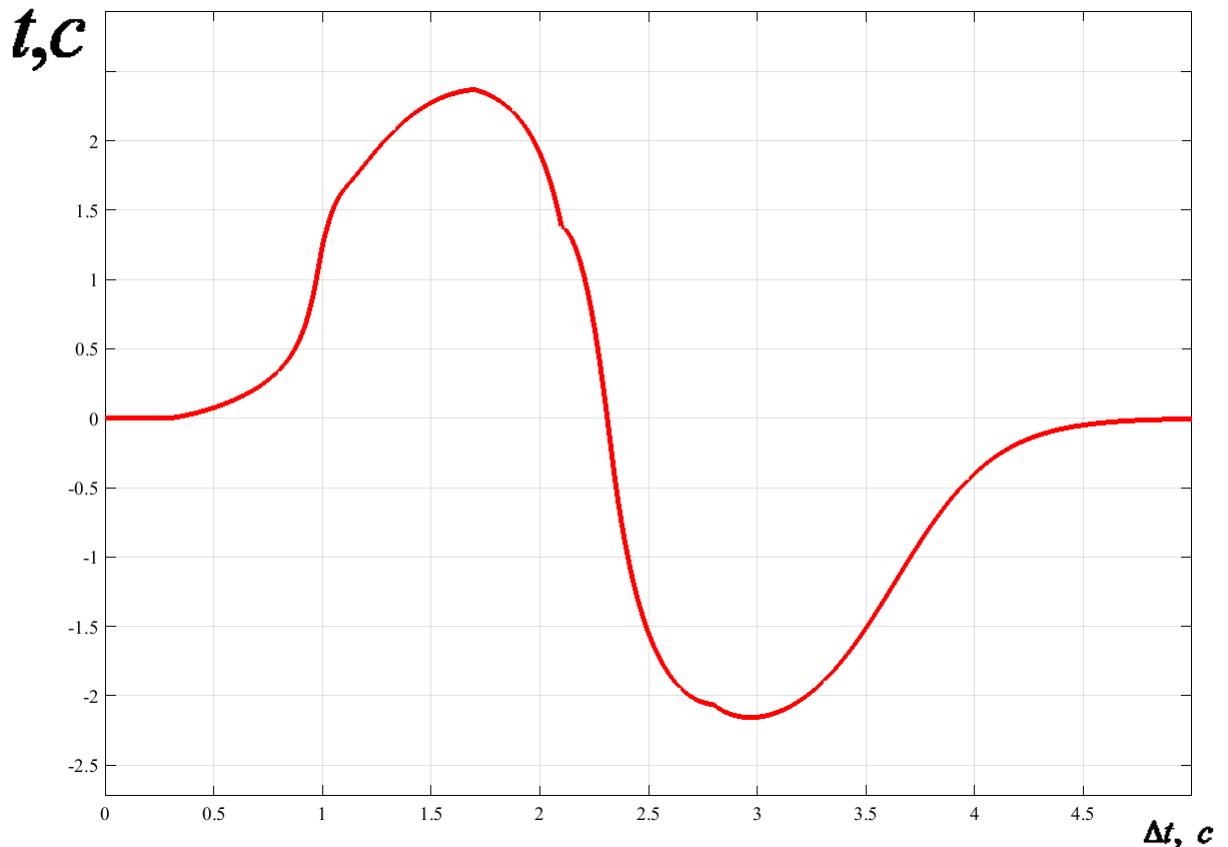


Рисунок 3.14 - Боковое ускорение центра масс беспилотного АТС

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.14, можно сделать вывод о том, что максимум бокового ускорения  $2,3 \text{ м} / \text{с}^2$  достигается в моменты смены направления движения беспилотного АТС.

На рис. 3.15 представлен график изменения угловой скорости кузова беспилотного АТС относительно вертикальной оси в процессе выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

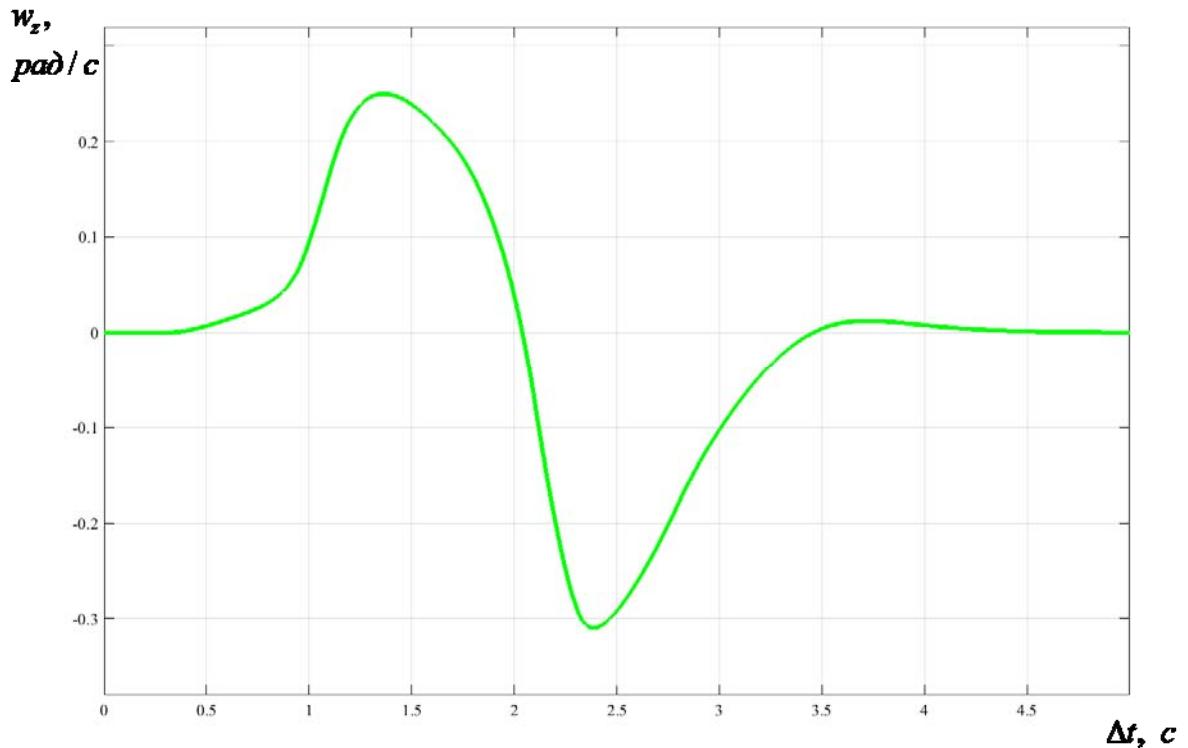


Рисунок 3.15 - Угловая скорость поворота корпуса беспилотного АТС

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.15, можно сделать вывод о том, что максимум угловой скорости поворота корпуса беспилотного АТС  $0,24 \text{ rad/c}$  достигается в моменты смены направления движения беспилотного АТС.

На рис.3.16 представлен график изменения степени использования мощности двигателя беспилотного АТС в процессе выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

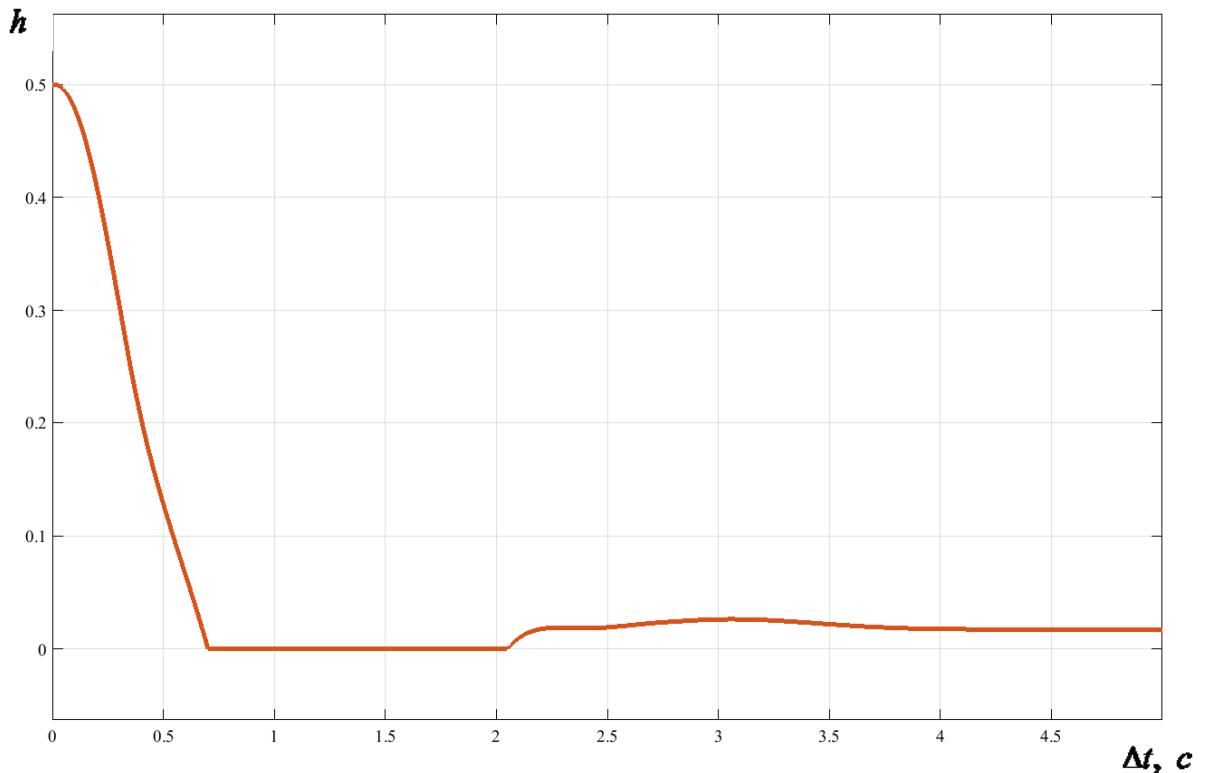


Рисунок 3.16 – Степень использования мощности двигателя беспилотного АТС

Для поддержания постоянной скорости при выполнении маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20\text{м}$ », требуется незначительная часть мощности энергетической установки (см. рис. 3.16).

Закон управления движением беспилотного АТС, представленный на рис. 3.17, позволил успешно выполнить маневр «Переставка  $S_{\Pi} = 20\text{м}$ » на максимальной скорости  $V_{\max} = 65 \text{ км/ч}$ .

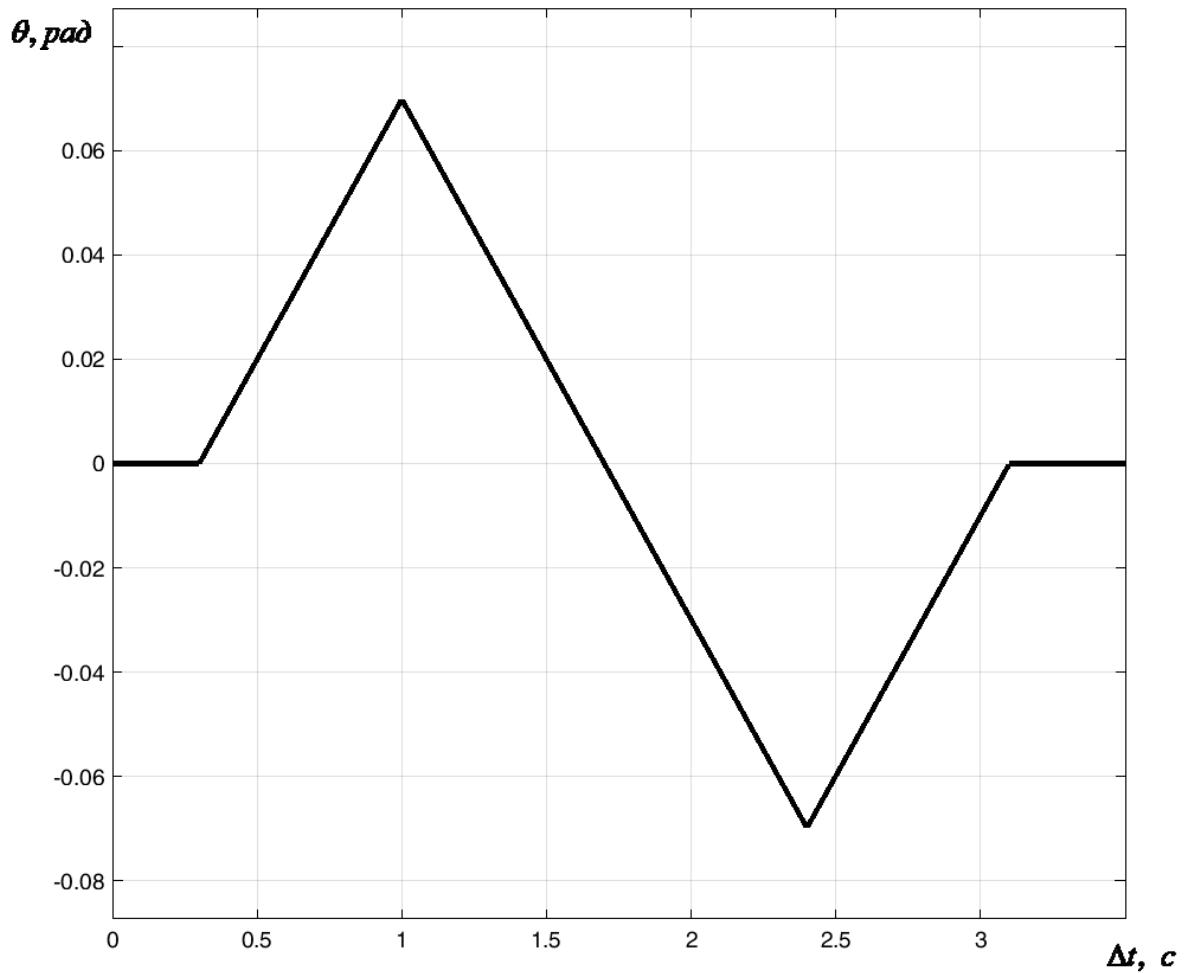


Рисунок 3.17 - Закон управления движением беспилотного АТС при выполнении манёвра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ »

На рис. 3.18 представлены графики изменения боковых реакций колес при выполнении маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ » беспилотным АТС на максимальной скорости  $V_{\max} = 65 \text{ км/ч}$ .

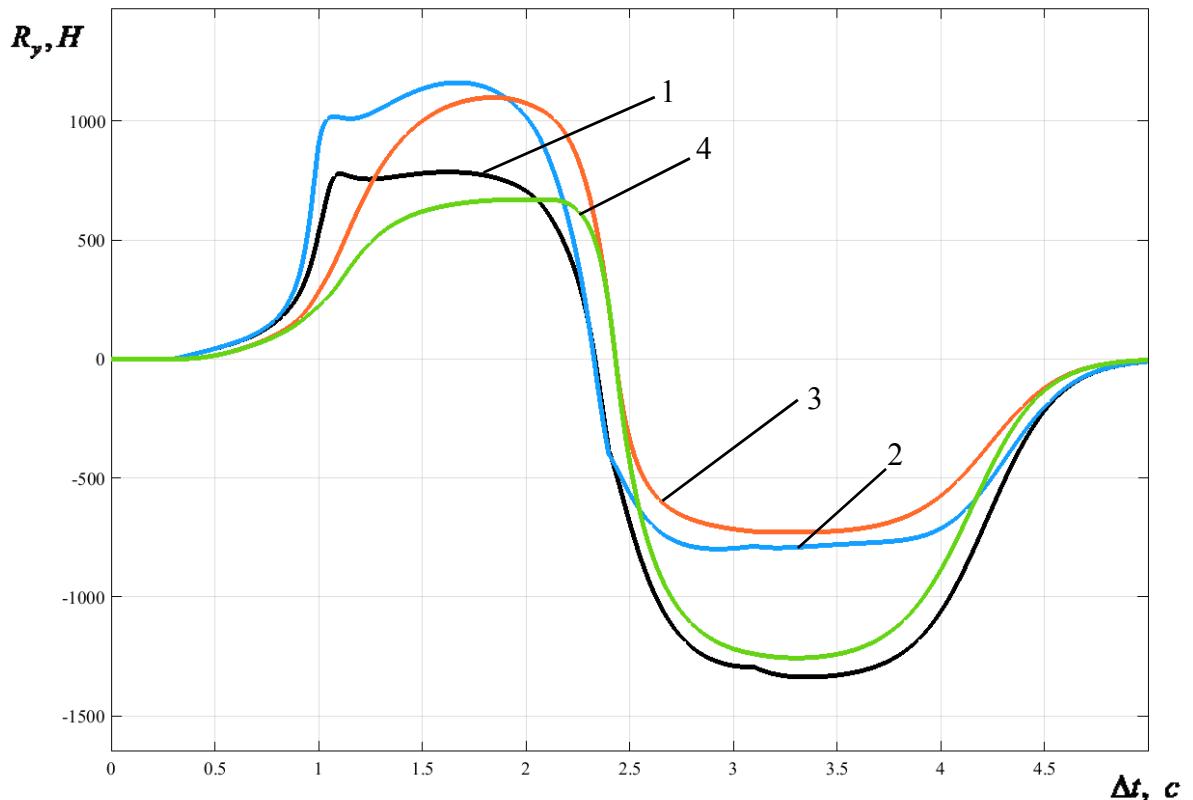


Рисунок 3.18 - Боковые реакции на колесах беспилотного АТС

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.18 можно сделать вывод о том, что в процессе выполнения маневра наиболее нагруженными боковой силой  $R_y = 1100$  H являются колеса 1 и 2. Максимум боковой силы достигается в моменты смены направления движения беспилотного АТС.

На рис. 3.19 представлены графики изменения нормальных реакций колес беспилотного АТС в процессе выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

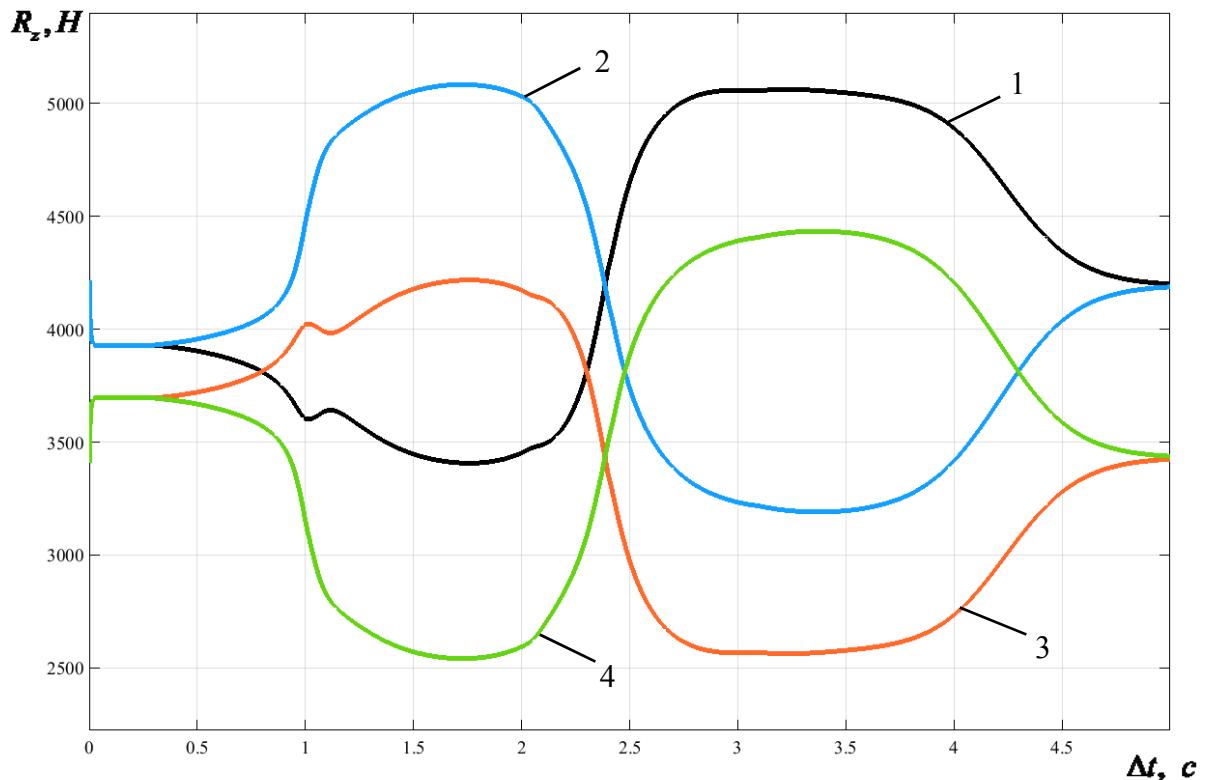


Рисунок 3.19 – Нормальные реакции колес беспилотного АТС

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.19 можно сделать вывод о том, что в процессе выполнения маневра максимальное значение нормальной реакции  $R_z = 5100 \text{ H}$  на колесе 2 достигается на 1,7 секунде расчета.

На рис. 3.20 представлены угловые скорости вращения колес беспилотного АТС при выполнении маневра «Переставка  $S_{II} = 20\text{м}$ ».

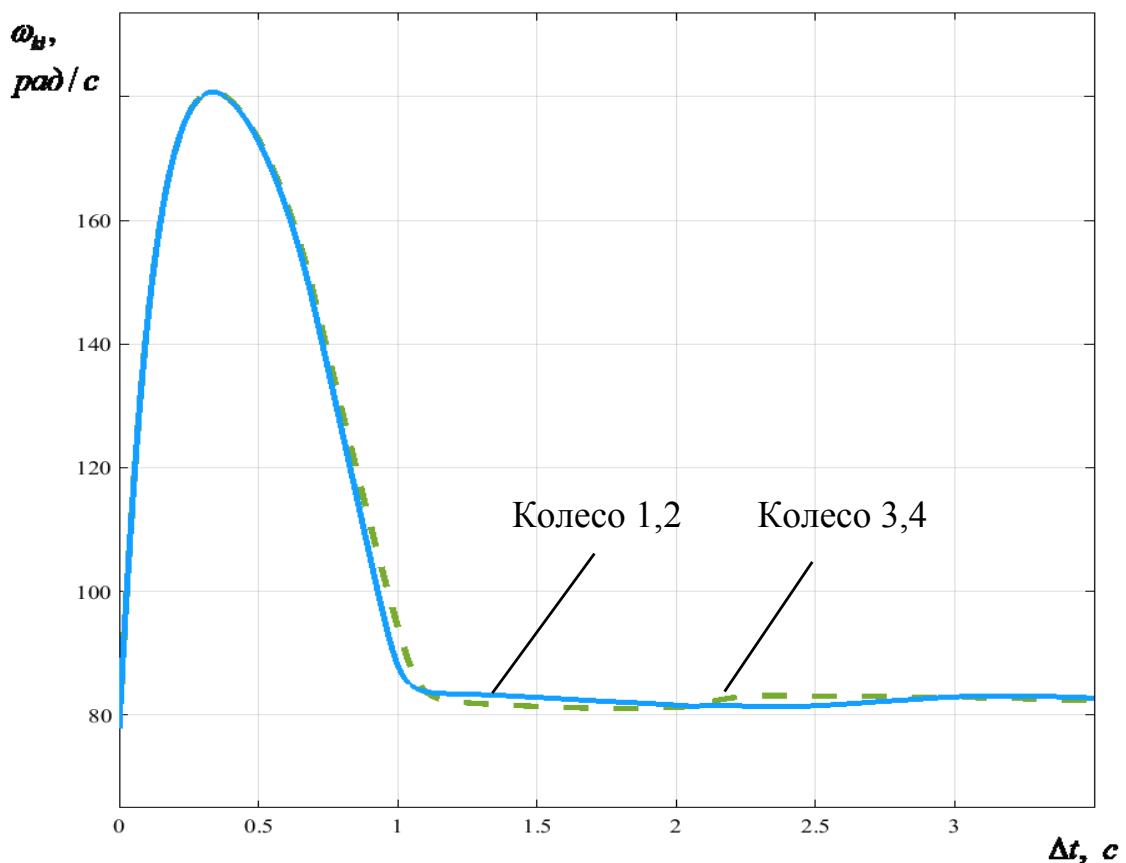


Рисунок 3.20 – Угловые скорости вращения колес беспилотного АТС

Анализируя результаты, представленные на рис. 3.20 можно сделать вывод о том, что в процессе выполнения маневра разница в величинах значений угловых скоростей вращения колес не превышает 3%. Это свидетельствует о том, что маневр был выполнен без наступления критических режимов по скольжению.

На рис. 3.21 представлена траектория успешного выполнения маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20\text{м}$ » на опорном основании с низкими сцепными свойствами.

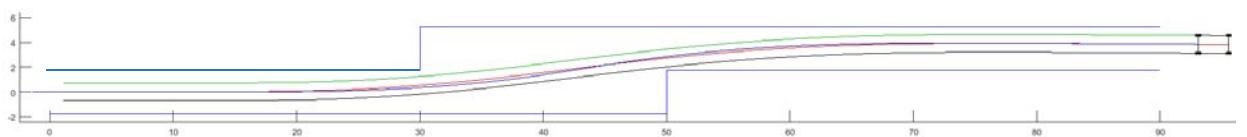


Рисунок 3.21 – Траектория выполнения маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20\text{м}$ ».

Опорное основание с низкими сцепными свойствами.

Для беспилотного АТС на базе автомобиля LADA-Калина были определены максимальные скорости безопасного выполнения маневра «Переставка  $s=20$  м» на опорном основании с низкими сцепными свойствами с различным временем задержки сигнала управляющего воздействия, результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Максимальные скорости безопасного выполнения маневра «Переставка  $s=20$  м» на опорном основании с низкими сцепными свойствами при различном времени задержки сигнала управляющего воздействия.

$V_{\max}$ , км / ч	$\Delta t$ , с
65	0,1
60	0,153
50	0,25
40	0,31
30	0,35
20	0,4
10	0,43
5	0,6

Таким образом, по результатам имитационного математического моделирования были получены значения задержки сигналов управляющего воздействия для различных скоростей успешного выполнения маневра «Переставка  $s=20$  м».

На рис. 3.22 представлена графическая зависимость максимальной скорости безопасного выполнения маневра «Переставка  $s=20$  м» от времени задержки сигнала управляющего воздействия  $\Delta t$ .

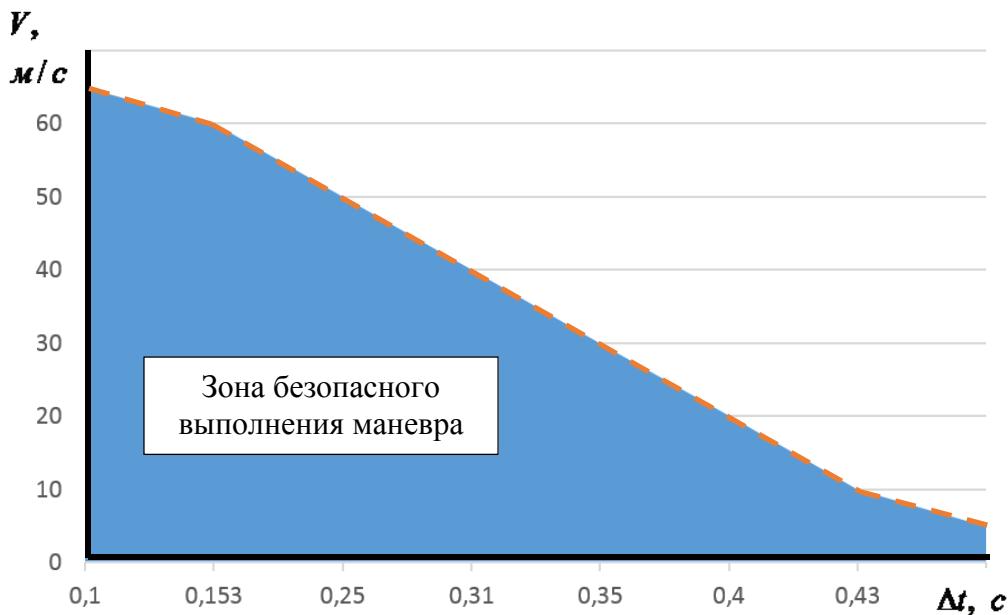


Рисунок 3.22 – Зависимость максимальной скорости безопасного выполнения маневра «Переставка  $s=20$  м» от времени задержки сигнала управляющего воздействия  $\Delta t$ , опорное основание с низкими сцепными свойствами

### 3.4 Теоретические исследования движения беспилотного АТС по заданному маршруту

Для исследования характеристик криволинейного движения беспилотного АТС при движении по заданному маршруту, смоделирована трасса, характеристики которой представлены в табл. 3.3.

Ширина трассы  $H = 3,75$  м соответствует ГОСТ 52399-2005 «Геометрические элементы автомобильных дорог». Моделирование прохождения трассы беспилотным АТС осуществлялось на ровном твердом опорном основании с высокими сцепными свойствами. Время задержки управляющего воздействия увеличивалось до момента выхода беспилотного АТС из коридора движения, что позволило определить максимальную

скорость успешного прохождения трассы без потери устойчивости и управляемости.

Таблица 3.3 - Координаты точек траектории для прохождения трассы (индекс Т). Координаты точек, определяющих геометрию правой полосы (индекс П) и левой полосы (индекс Л)

<b>T</b>	<b>x (м)</b>	<b>y (м)</b>	<b>П</b>	<b>x (м)</b>	<b>y (м)</b>	<b>Л</b>	<b>x (м)</b>	<b>y (м)</b>
<b>T0</b>	0	0	<b>П0</b>	0	-1,88	<b>Л0</b>	4,52	1,86
<b>T1</b>	25	0	<b>П1</b>	25	-1,88	<b>Л1</b>	25	1,86
<b>T2</b>	36,77	1,14	<b>П2</b>	37,14	-0,68	<b>Л2</b>	36,40	2,98
<b>T3</b>	48,09	4,58	<b>П3</b>	48,81	2,85	<b>Л3</b>	47,37	6,31
<b>T4</b>	58,53	10,16	<b>П4</b>	59,57	8,6	<b>Л4</b>	57,48	11,72
<b>T5</b>	67,67	17,66	<b>П5</b>	69	16,34	<b>Л5</b>	66,35	18,99
<b>T6</b>	84,03	34,01	<b>П6</b>	85,35	32,69	<b>Л6</b>	85,35	37,99
<b>T7</b>	84,63	34,42	<b>П7</b>	120,71	-2,66	<b>Л7</b>	120,71	2,64
<b>T8</b>	85,35	34,56	<b>П8</b>	157,39	34,01	<b>Л8</b>	154,74	36,67
<b>T9</b>	86,07	34,42	<b>П9</b>	162,49	41,71	<b>Л9</b>	159,02	43,15
<b>T10</b>	86,68	34,01	<b>П10</b>	161,18	50,76	<b>Л10</b>	160,43	50,76
<b>T11</b>	119,38	1,31	<b>П11</b>	162,25	59,71	<b>Л11</b>	158,78	58,28
<b>T12</b>	119,99	0,9	<b>П12</b>	157,05	67,17	<b>Л12</b>	154,40	64,52
<b>T13</b>	120,71	0,76	<b>П13</b>	149,45	72,04	<b>Л13</b>	148,02	68,57
<b>T14</b>	121,42	0,9	<b>П14</b>	140,64	73,64	<b>Л14</b>	140,64	69,89
<b>T15</b>	122,03	1,31	<b>П15</b>	131,92	71,81	<b>Л15</b>	133,36	68,34
<b>T16</b>	156,06	35,34	<b>П16</b>	124,56	66,84	<b>Л16</b>	127,21	64,19
<b>T17</b>	160,75	42,43	<b>П17</b>	118,24	62,62	<b>Л17</b>	119,68	59,16
<b>T18</b>	162,31	50,76	<b>П18</b>	110,79	61,14	<b>Л18</b>	110,79	57,39
<b>T19</b>	160,52	58,99	<b>П19</b>	103,35	62,62	<b>Л19</b>	101,91	59,16
<b>T20</b>	155,72	65,85	<b>П20</b>	97,03	66,84	<b>Л20</b>	94,38	64,19
<b>T21</b>	148,74	70,31	<b>П21</b>	89,5	71,88	<b>Л21</b>	88,07	68,41
<b>T22</b>	140,64	71,77	<b>П22</b>	80,62	73,64	<b>Л22</b>	80,62	69,89
<b>T23</b>	132,64	70,07	<b>П23</b>	71,73	71,88	<b>Л23</b>	73,17	68,41
<b>T24</b>	125,88	65,52	<b>П24</b>	64,2	66,84	<b>Л24</b>	66,85	64,19
<b>T25</b>	118,96	60,89	<b>П25</b>	0	2,64	<b>Л25</b>	4,5	1,86
<b>T26</b>	110,79	59,27	-	-	-	-	-	-
<b>T27</b>	102,63	60,89	-	-	-	-	-	-
<b>T28</b>	95,71	65,52	-	-	-	-	-	-
<b>T29</b>	88,78	70,14	-	-	-	-	-	-
<b>T30</b>	80,62	71,77	-	-	-	-	-	-
<b>T31</b>	72,45	70,14	-	-	-	-	-	-
<b>T32</b>	65,53	65,52	-	-	-	-	-	-
<b>T33</b>	0,001	0,001	-	-	-	-	-	-

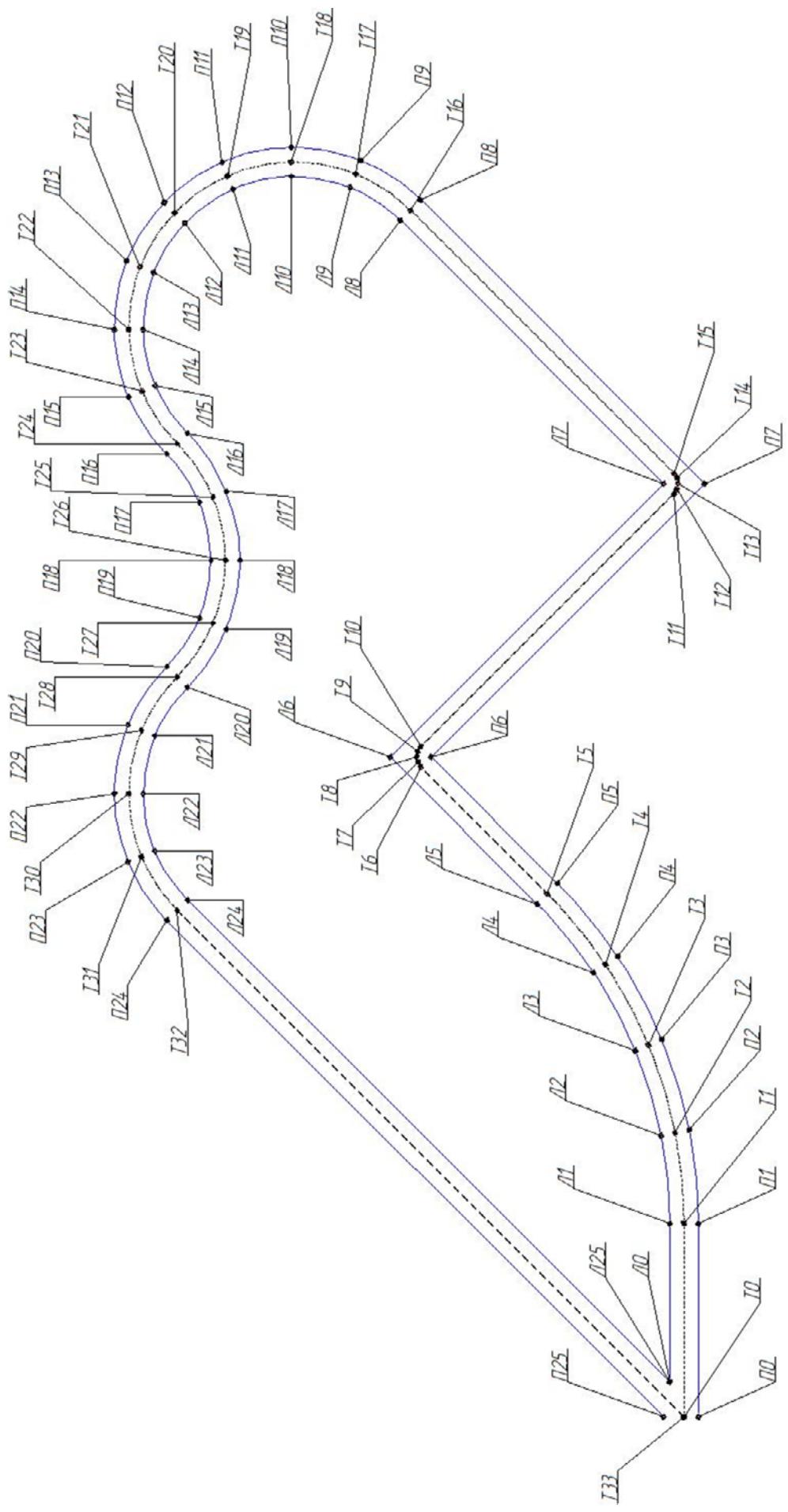
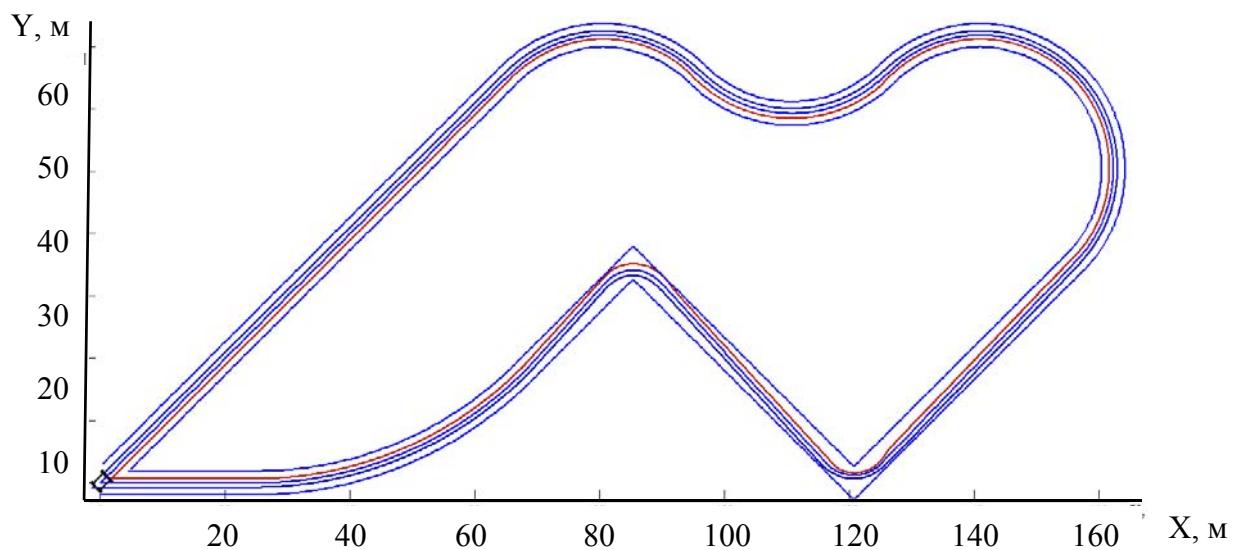


Рисунок 3.23 – Трасса для виртуальных испытаний беспилотного АТС

Для того, чтобы обеспечить движение автомобиля по заданной траектории, предлагается следующая стратегия работы рулевого управления: в каждой точке трассы вычисляется производная координаты «игрек» трассы по координате «икс». Так как производная есть тангенс угла наклона касательной, то вычитая из угла касательной, найденного исходя из траектории, угол текущего положения продольной оси автомобиля в неподвижной системе координат, получаем угол, на который необходимо повернуть руль, чтобы обеспечить движение автомобиля по касательной к заданной траектории. Полученный угол поворота рулевого колеса пересчитывается в углы поворота управляемых колес, согласно геометрии рулевой трапеции с учетом передаточного числа рулевого механизма.

### **3.5 Результаты теоретических исследований движения беспилотного АТС по заданному маршруту**

На рис. 3.24 представлена траектория движения беспилотного АТС при прохождении трассы (рис. 3.23). Максимальная скорость безопасного прохождения трассы беспилотным АТС составила 11 км/ч при условии отсутствия задержки управляющего сигнала.



**Рисунок 3.5 – Траектория движения беспилотного АТС  
при прохождении трассы**

По результатам имитационного математического моделирования были определены максимальные скорости успешного прохождения заданной трассы на опорном основании с высокими сцепными свойствами с различным временем задержки сигнала управляющего воздействия, результаты представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Максимальные скорости успешного прохождения заданной трассы на опорном основании с высокими сцепными свойствами с различным временем задержки сигнала управляющего воздействия

$V_{\max}$ , км / ч	$\Delta t$ , с
11	0,56
10	0,64
9	0,73
8	0,83
7	0,94
5	1,06
4	1,19
3	1,33
2	1,47
1	1,64

Полученные результаты позволяют осуществить выбор рациональных параметров системы управления «беспилотным» АТС для обеспечения движения в заданной маршрутом габаритной ширине трассы при одновременном выполнении требований безопасности.

Таким образом предложенный метод прогнозирования характеристик криволинейного движения беспилотного АТС позволяет определить рациональные параметры системы управления на совокупности дорожных

условий при выполнении типовых маневров или при движении по заданному маршруту.

### **3.3 Выводы**

1. Получены результаты теоретических исследований выполнения типового маневра «Переставка  $s = 20$  м» беспилотного АТС:

- определена максимальная скорость 94 км/ч выполнения маневра «Переставка  $s = 20$  м» на опорном основании с высокими сцепными свойствами для беспилотного АТС на базе автомобиля «LADA-Калина»;
- определена максимальная скорость 65 км/ч выполнения маневра «Переставка  $s = 20$  м» на опорном основании с низкими сцепными свойствами для беспилотного АТС на базе автомобиля «LADA-Калина»;
- определены максимальные значения задержки сигналов управляющего воздействия для различных скоростей движения при выполнении маневра «Переставка  $s = 20$  м» на опорном основании с высокими сцепными свойствами;
- определены максимальные значения задержки сигналов управляющего воздействия для различных скоростей движения при выполнении маневра «Переставка  $s = 20$  м» на опорном основании с низкими сцепными свойствами.

2. Получены результаты теоретических исследований при движении беспилотного АТС по заданному маршруту в ограниченном габаритном коридоре:

- определена максимальная скорость 11 км/ч прохождения маршрута по заданной траектории, без выхода за границы построенного коридора движения, ширина которого соответствует стандартам разметки полос дорог общего пользования;
- определены зависимости влияния значений времени задержки сигналов управляющего воздействия на скорость безопасного прохождения маршрута.

3. Полученные результаты теоретических исследований позволяют прогнозировать характеристики криволинейного движения беспилотного АТС с учетом задержки сигналов управляющего воздействия, а также проводить выбор рациональных параметров системы управления, обеспечивающих выполнение требований безопасности.

## ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТИПОВЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АТС

### 4.1 Цели и задачи экспериментальных исследований

Целью проведения экспериментальных исследований является определение характеристик криволинейного движения беспилотного АТС. В цели исследований также входит сравнение результатов, полученных в ходе натурных испытаний, с данными имитационного моделирования для оценки адекватности разработанной математической модели криволинейного движения автопоезда по ровному твердому опорному основанию и определения её точности.

В качестве объекта исследований выбрано беспилотное АТС на базе автомобиля «LADA-Калина» с механической и электрической трансмиссией.

Общие виды исследуемого беспилотного АТС перед началом экспериментальных заездов представлены на рис. 4.1-4.2.



Рисунок 4.1 – Беспилотное АТС на базе «LADA-Калина» с механической трансмиссией

Основные технические характеристики автомобиля «LADA-Калина» с механической трансмиссией представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики автомобиля «LADA-Калина» с механической трансмиссией

<b>Модификации автомобиля</b>		<b>LADA-Калина 1118 1.6 i</b>
<b>Двигатель</b>		
Мощность (л.с/ об. мин)		80/5200
Крутящий момент (Нм / об.мин)		120/2700
<b>Трансмиссия</b>		
Колесная формула / ведущие колеса		4Х2/передние
Коробка передач		механическая
Число передач		5
<b>Рулевое управление</b>		
Тип		Реечного типа
<b>Тормозная система</b>		
Передние тормоза		Дисковые
Задние тормоза		Барабанные
<b>Подвеска</b>		
Тип передней подвески		Амортизационная стойка
Тип задней подвески		Продольный рычаг
<b>Кузов</b>		
Длина		4040 мм
Ширина		1670 мм
Высота		1500 мм
Колея передних колес, мм		1430 мм
Колея задних колес, мм		1410 мм
Клиренс		160 мм
Снаряженная масса		1080
<b>Эксплуатационные характеристики</b>		
Время разгона до 100 км / ч		12.9 с
Максимальная скорость		170 км/ч
Размер шин		R14 175/65
Расход топлива городской цикл (л / 100 км)		9.8
Объем бака		50

Автомобиль предназначен для перевозки людей и багажа при температуре окружающего воздуха от минус 40 °C до плюс 50 °C по дорогам общего пользования с твердым покрытием, отвечающим требованиям ГОСТ Р 50597.

В состав исполнительных механизмов беспилотного АТС «LADA-Калина» входит следующие устройства:

- линейные актуаторы;
- сервопривод;
- электрический усилитель рулевого управления.

Измерительная аппаратура:

- датчик линейного перемещения актуаторов;
- линейный потенциометр.

В составе системы технического зрения в системе управления движением беспилотного АТС применены следующие компоненты:

- видеокамера AXIS P1346;
- лидар SLR 1;
- ультразвуковые датчики.

Беспилотное АТС имеет три режима управления:

### *1. Режим «Водитель»*

В этом режиме беспилотное АТС используется как самый обычный автомобиль, не имея никаких ограничений.

### *2. Режим «Телеуправление»*

В этом режиме возможно дистанционно управлять автомобилем при помощи компьютера, с установленным специализированным программным обеспечением, или при помощи специализированного джойстика.

### *3. Режим «Автономное движение»*

Данный режим представляет собой беспилотное управление автомобилем при помощи технического зрения и системы исполнительных механизмов. Беспилотное АТС может: двигаться по коридору, объезжая препятствия на своем пути; воспроизводить ранее записанную траекторию; совершать манёвр «параллельная парковка».

Беспилотное АТС «LADA-Калина» оснащено механической коробкой передач и системой, позволяющей переключать передачи, как вручную (в режиме «Водитель»), так и автоматически (в режимах «Телеуправление» и «Автономное движение»). Для автоматического управления рулевым колесом используется штатный электрический усилитель руля со специально разработанным блоком управления. Дроссельная заслонка управляет с помощью установленного серводвигателя. Нажатие и отпускание педали тормоза происходит благодаря механическому воздействию линейного актуатора. В зависимости от выбранного режима, в беспилотном АТС активируются различные датчики и алгоритмы для их обработки.



Рисунок 4.2 – Беспилотное АТС на базе «LADA-Калина» с электрической трансмиссией

Основные технические характеристики автомобиля «LADA-Калина» с электрической трансмиссией представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Основные технические характеристики автомобиля «LADA-Калина» с электрической трансмиссией

Модификации автомобиля	LADA-Калина 1117
<b>Тяговый модуль</b>	
Номинальная мощность (кВт)	30
Максимальная мощность (кВт)	70
Мощность при рекуперации (кВт)	30
<b>Аккумуляторная батарея тягового модуля</b>	
Энергоемкость (кВт*ч)	13
Номинальное напряжение (В)	300
Максимальный ток разряда (А)	250
Максимальный ток заряда (А)	100
<b>Рулевое управление</b>	
Тип	с электромеханическим усилителем
<b>Тормозная система</b>	
Передние тормоза	Дисковые
Задние тормоза	Барабанные
<b>Подвеска</b>	
Тип передней подвески	Амортизационная стойка
Тип задней подвески	Продольный рычаг
<b>Кузов</b>	
Длина	4040 мм
Ширина	1700 мм
Высота	1500 мм
Колея передних колес, мм	1430 мм
Колея задних колес, мм	1410 мм
Клиренс	160 мм
Снаряженная масса	1200
<b>Эксплуатационные характеристики</b>	
Время разгона до 100 км/ч	20 с
Максимальная скорость	120 км/ч
Время полного заряда (ч)	6
Время ускоренного заряда (ч)	1,5
Температура эксплуатации (°C)	- 30 ... +50

## 4.2 Аппаратурно-измерительная часть

При проведении испытаний использовалась система точного позиционирования Genesys ADMA-G.

Система ADMA-G была разработана специально для измерения динамики движения автомобиля. ADMA-G может измерять как скорость, так и ускорение во всех трех пространственных осях. А также при перемещении постоянно измеряется тангаж, крен и курсовой угол транспортного средства. ADMA-G это полная версия ADMA с добавленным встроенным GPS модулем для задач, которые требуют высокую точность позиционирования.

Система Genesys ADMA-G состоит из следующих компонентов:

1. Три датчика скорости вращения с обратной связью (нечувствительные к ускорению) для обнаружения вращательного движения в пространстве;
2. Три серво-акселерометра для определения ускорений;
3. Внутренний приемник GPS для точного позиционирования с абсолютной коррекцией WAAS или DGPS RTK;
4. Непосредственно модуль ADMA - процессорный блок с 32-битной DSP, который вычисляет угол ориентации или положения непрерывно от внутренних сигналов датчиков и внешней информации (например, датчики скорости);
5. GPS антенна;
6. Радио модуль;
7. Радиоантенна;
8. Базовая станция GPS;
9. Набор кабелей для подключения (ADMA-COM, ADMA-CAN, кабель для подключения GPS модуля и GPS антенны, кабель для подключения радио модуля и радиоантенны).

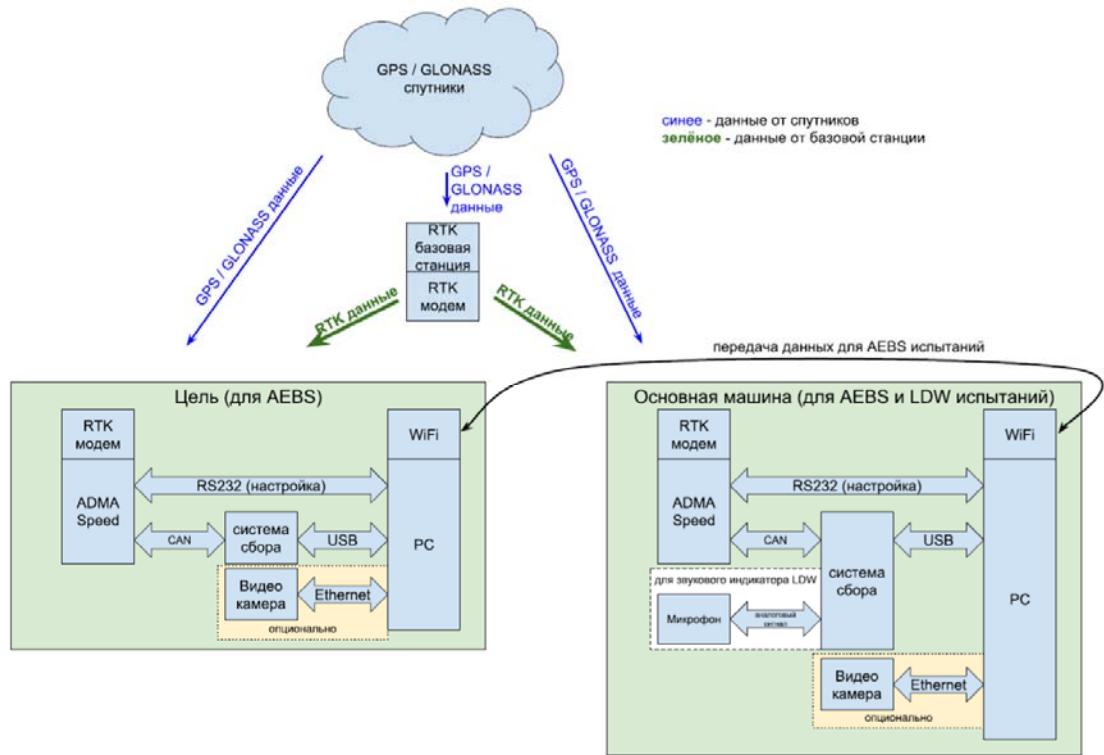


Рисунок 4.3 – Схема взаимодействия элементов системы Genesys ADMA-G

Данная система работает, как с использованием базовой станции, так и без неё. Базовая станция позволяет значительно уменьшить погрешность GPS системы, позволяя получать координаты сразу с 13 спутников. Однако для увеличения точности позиционирования базовой станции необходимо время для самостоятельной настройки. Так же система ADMA-G имеет инерциальную систему отсчёта, что позволяет повысить её точность.

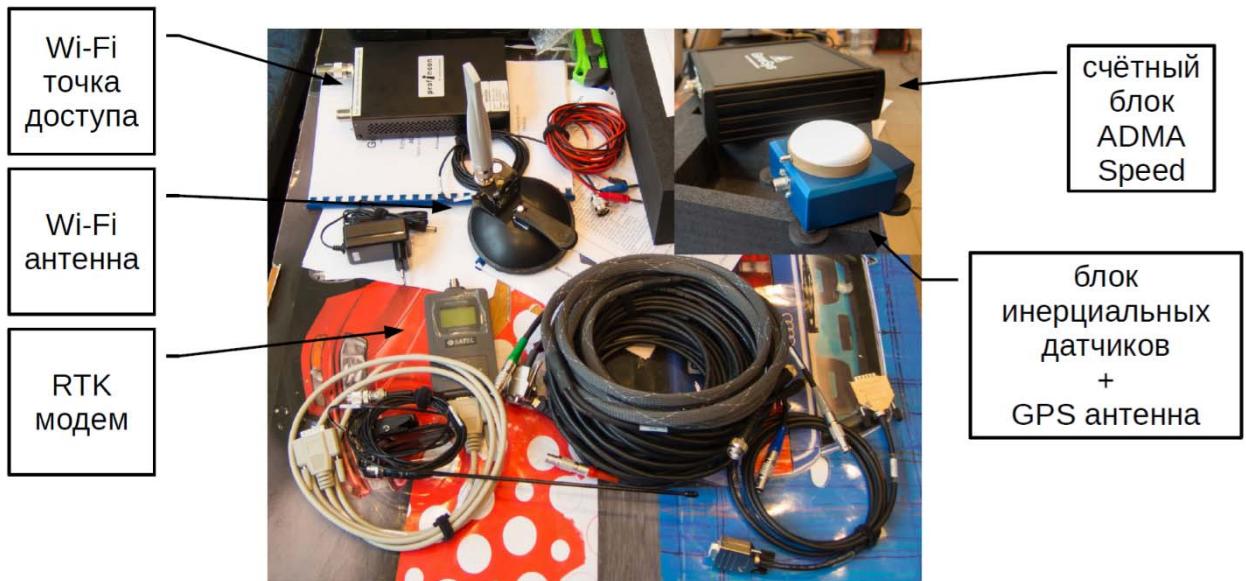


Рисунок 4.4 – Состав системы Genesys ADMA-G

Система позволяет производить запись ряда параметров с привязкой ко времени и GPS координатам. Записанные данные представляются в виде таблицы. При подключении дополнительных периферийных устройств, возможно, повторять записанный маршрут с высокой точностью.

На рис. 4.5 представлен внешний вид беспилотного АТС «LADA-Калина» с внедренной системой ADMA-G.



Рисунок 4.5 – Внешний вид беспилотного АТС на базе «LADA-Калина» с подключенной системой ADMA-G и развернутой базовой станцией

Система монтируется непосредственно на борту беспилотного АТС (за исключением базовой GPS станции). GPS антенна устанавливается на крышу автомобиля и в системе координат автомобиля совмещается с центром масс по осям  $ox$  и  $oy$ . Если установка в данное место невозможна, допускается смещение антенны по одной из осей.

На рисунке 4.6 представлено схематическое размещение GPS антенны и радиоантенны.

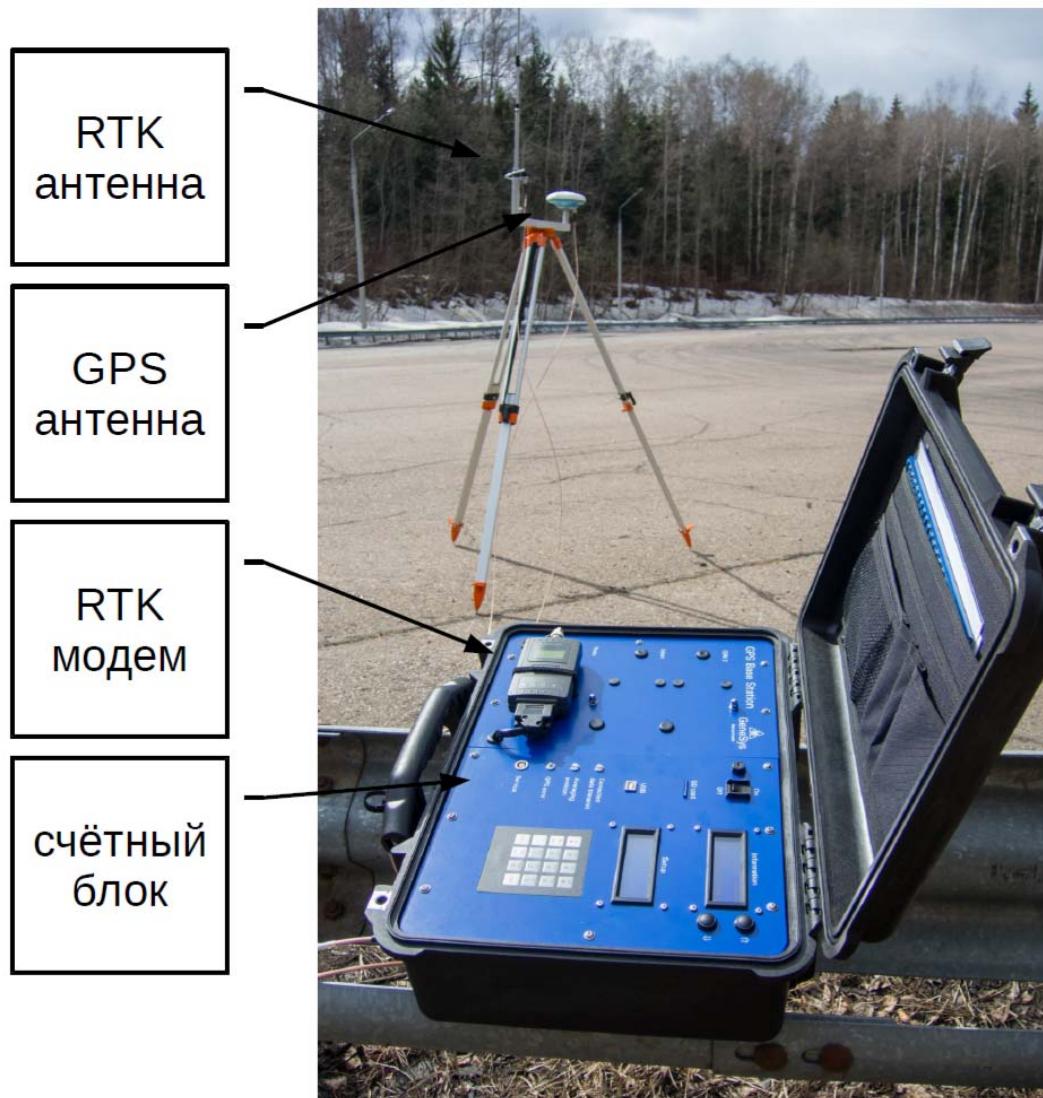


Рисунок 4.6 – Схематическое размещение GPS антенны и радиоантенны

#### **4.3 Условия и методики проведения экспериментальных исследований**

Испытания проводились на экспериментально-исследовательской базе НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» г. Дмитров. В качестве полигона для испытаний была выбрана динамометрическая дорога - прямолинейная, горизонтальная, проложена с севера на юг (с учетом розы ветров). По обеим сторонам дороги имеется естественная защита (лес) от бокового ветра, что крайне необходимо при измерениях. Дорога предназначается для испытания автомобилей на тягово-скоростные качества, тормозные качества, топливную экономичность,

управляемость и устойчивость. Общая длина динамометрической дороги составляет 5,4 км, а длина горизонтальной части - 4,7 км.



Рисунок 4.7 – Динамометрическая дорога Дмитровского автополигона

Северный конец дороги переходит в круглую горизонтальную площадку, предназначенную для определения маневренных качеств автомобилей, их управляемости и устойчивости, а также для разворота, диаметр площадки 104,24 м. На южной стороне дороги находятся разворотные петли. Для повышения безопасности при испытаниях автомобилей, особенно высокоскоростных, на обоих концах динамометрической дороги устроены песчаные «тормозные» участки протяженностью более 100 м при ширине 15,5 м.

Испытания проводились в период с 01 октября по 20 октября 2015 г.

В качестве типовых манёвров для исследования характеристик криволинейного движения беспилотного АТС на базе автомобиля LADA-Калина

в соответствии с ГОСТ Р 52302-2004 «Автомобильные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний» выбраны «Переставка  $S_{II} = 20$  м» и «Поворот  $R = 25$  м» [ГОСТ Р 52302-2004].

Данный нормативный документ, а также ГОСТ Р 52280-2004, предусматривают различные испытания по оценке управляемости и устойчивости АТС: установление предельного значения усилия на рулевом колесе, стабилизацию прямолинейного движения после движения по радиусу, начало установившегося кругового движения после рывка рулём, скорость прохождения размеченных участков с различными радиусами поворота и др. Выбранные типы испытаний позволяют оценить показатели устойчивости и управляемости.

Порядок проведения экспериментальных исследований также соответствует [ГОСТ Р 52302-2004], но с учётом ряда особенностей, обусловленных работой системы управления движением.

#### *Методика экспериментального исследования типового манёвра «Поворот $R = 25$ м»*

При испытаниях выполняют заданный разметкой маневр (разметка участка испытаний представлена на рисунке 4.8) на скорости 3, 5 и 10 км/ч.

В соответствии с разметкой участка испытаний в вычислительное устройство управления движением беспилотного автомобиля вводится траектория движения, соответствующая «зачетному» заезду.

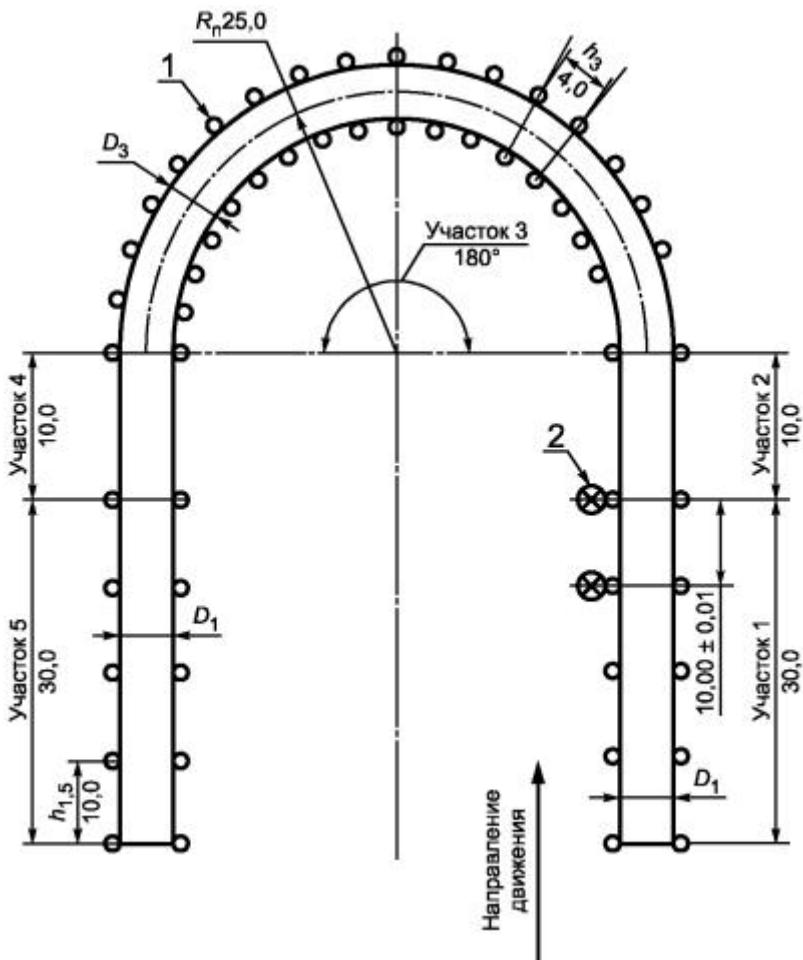


Рисунок 4.8 - Разметка участка испытаний «Поворот  $R = 25$  м»

Критерием, выбранным для оценки управляемости и устойчивости при криволинейном движении, является достижение максимальной скорости, при которой машина выполняет манёвр. Допустимая погрешность не должна превышать 4%, что составляет для манёвра «Поворот  $R = 35$  м» один метр.

Оценка результатов «успешного» выполнения маневра проводится по следующим показателям:

- $V_o$  - начальная скорость прямолинейного движения;
- $V_{ycm}$  - установившаяся при выполнении манёвра скорость;
- $R_\phi$  - фактический радиус поворота;
- $\omega_z$  - угловая скорость поворота корпуса;
- $a_y$  - боковое ускорение в центре масс ТС;

- $\theta_p$  - угол поворота рулевого колеса, приведенный к управляемой оси (без учета передаточного числа рулевого механизма);
- траектория движения ТС при выполнении маневра;
- $\omega_{1,2,3,4}$  - угловая скорость вращения колес.

Поскольку, большую часть времени движение в повороте является установившимся, то для приведённых выше величин представляет интерес значение, регистрируемое после завершения переходного процесса.

Испытания проводятся на опорном основании с высокими сцепными свойствами (максимальный коэффициент сцепления, соответствующий полному буксованию движителя, принимается равным 0,8).

*Методика экспериментального исследования типового манёвра  
«Переставка  $S_n = 20$  м»*

Закон управления поворотом задающего колеса  $\theta_p$  представлен на рис. 4.9. При проведении экспериментальных исследований по выполнению манёвра «Переставка» беспилотным ТС на базе «LADA-Калина» для каждой скорости уточняются максимальные углы поворота задающего (рулевого) колеса и момент времени, соответствующий началу управляющего воздействия.

Оценочным параметром при выполнении данного манёвра является его предельно возможная скорость выполнения.

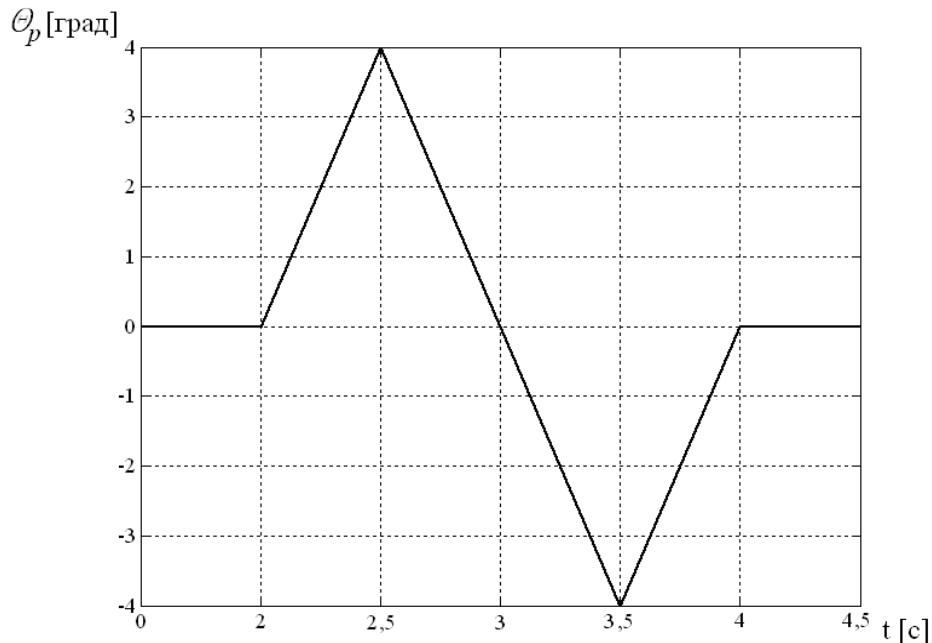


Рисунок 4.9 – Закон управления движением при выполнении манёвра «Переставка»

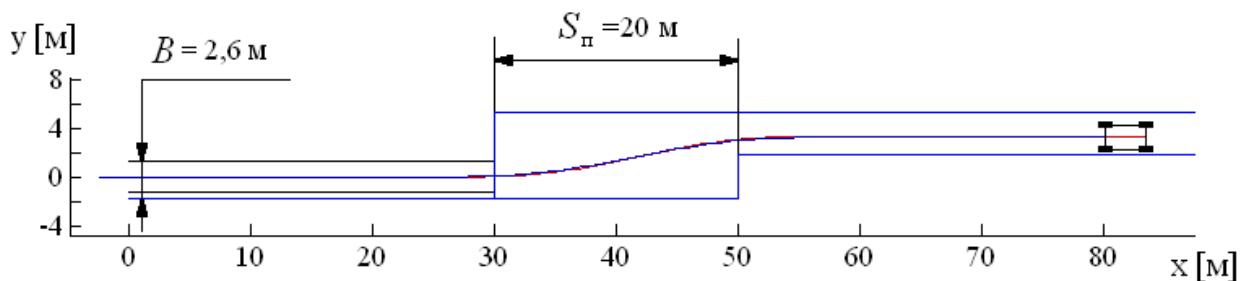


Рисунок 4.10 – Вид коридора движения при выполнении манёвра «Переставка  $S_{\Pi} = 20$  м»

Поворот колес начался при пересечении автомобилем границы начала коридора переставки ( $x = 30$  м рис. 4.10).

Оценка результатов «успешного» выполнения маневра проводится по следующим показателям:

- $V_o$  - начальная скорость прямолинейного движения;
- $V_{ycm}$  - установившаяся при выполнении манёвра скорость;
- $\omega_z$  - угловая скорость поворота корпуса;
- $a_y$  - боковое ускорение в центре масс ТС;

- $\theta_p$  - угол поворота рулевого колеса, приведенный к управляемой оси (без учета передаточного числа рулевого механизма);
- траектория движения ТС при выполнении маневра;
- $\omega_{1,2,3,4}$  - угловая скорость вращения колес.

Испытания проводятся на опорном основании с высокими сцепными свойствами (максимальный коэффициент сцепления, соответствующий полному буксированию движителя, принимается равным 0,8).

#### **4.4 Результаты экспериментальных исследований. Оценка адекватности математической модели**

*Результаты выполнения маневра «Переставка*  $S_{\Pi} = 20 \text{ м}$

Манёвр «Переставка» представляет собой перестроение автотранспортного средства из полосы движения в соседнюю полосу на заданной скорости. На рисунке 4.11 представлены кадры положений беспилотного АТС «LADA-Калина».



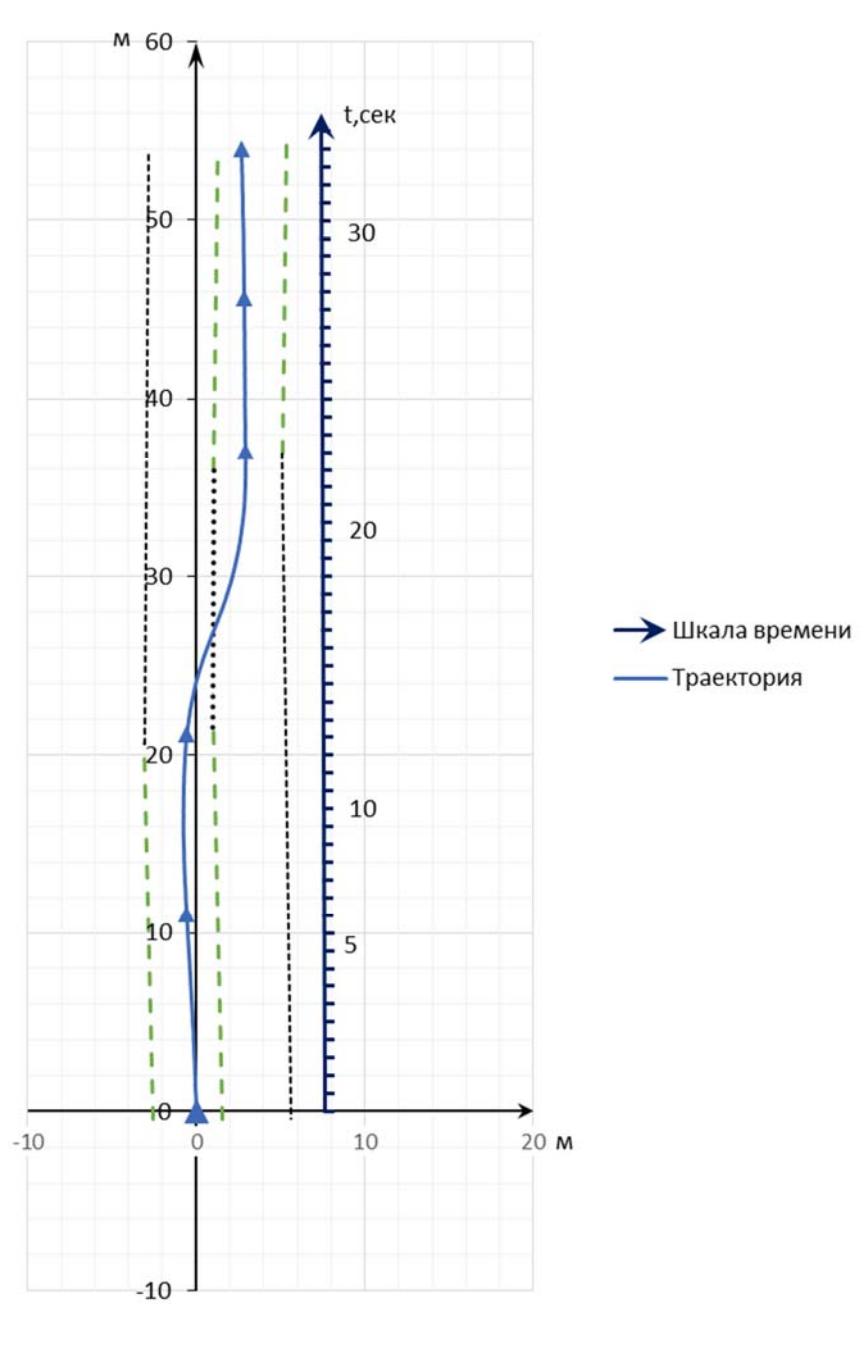






Рисунок 4.11 – Кадры положений беспилотного АТС «LADA-Калина» при выполнении маневра «Переставка  $S_{\pi} = 20$  м»

При выполнении маневра скорость беспилотного АТС «LADA-Калина» ограничивалась 10 км/ч. Траектория движения при выполнении данного манёвра, представлена на рис. 4.12.



Траектория движения беспилотного АТС на графике обозначена синим цветом. Черным пунктиром обозначены полосы движения. Зеленым пунктиром

обозначен коридор, размеченный конусами, внутри которого происходит движение беспилотного АТС. Отрезок пересечения разметки отмечен черными точками.

Из анализа графика траектории движения следует, что беспилотное АТС «LADA-Калина» безопасно выполнило маневр на скорости 10 км/ч.

На рис. 4.13 представлен закон управления движением беспилотного АТС «LADA-Калина» при выполнении маневра «Переставка  $S_{II} = 20$  м».

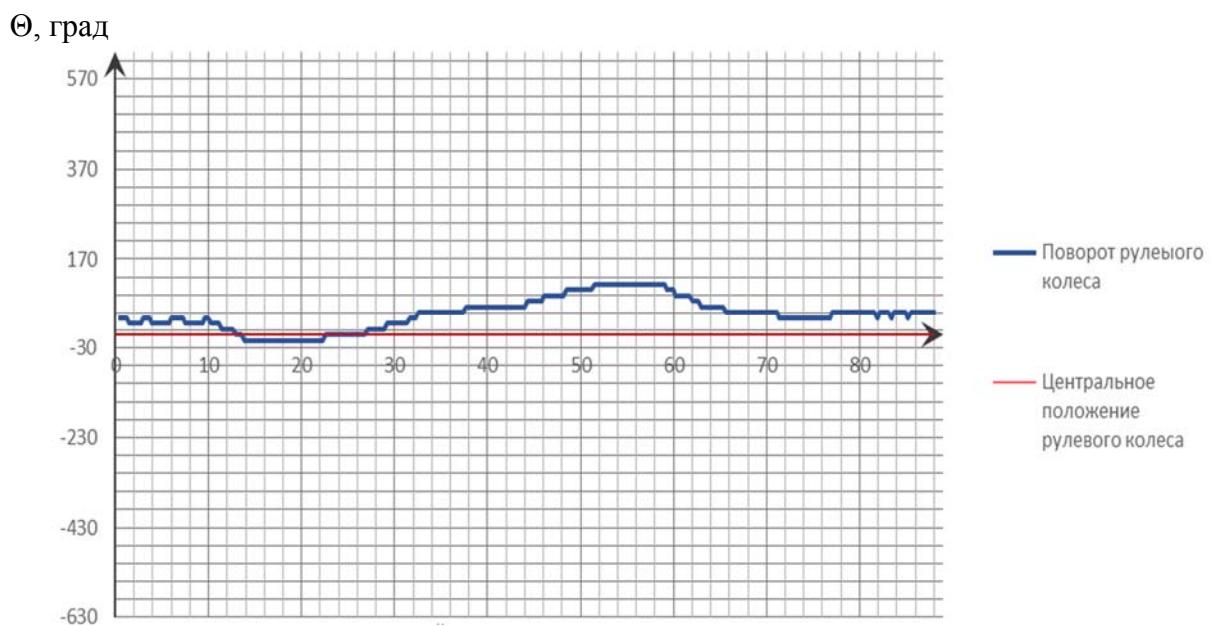


Рисунок 4.13 – Закон управления движением при выполнении маневра

«Переставка  $S_{II} = 20$  м»

На рис. 4.14 представлена реализация значений продольных ускорений беспилотного АТС при выполнении маневра «Переставка  $S_{II} = 20$  м».

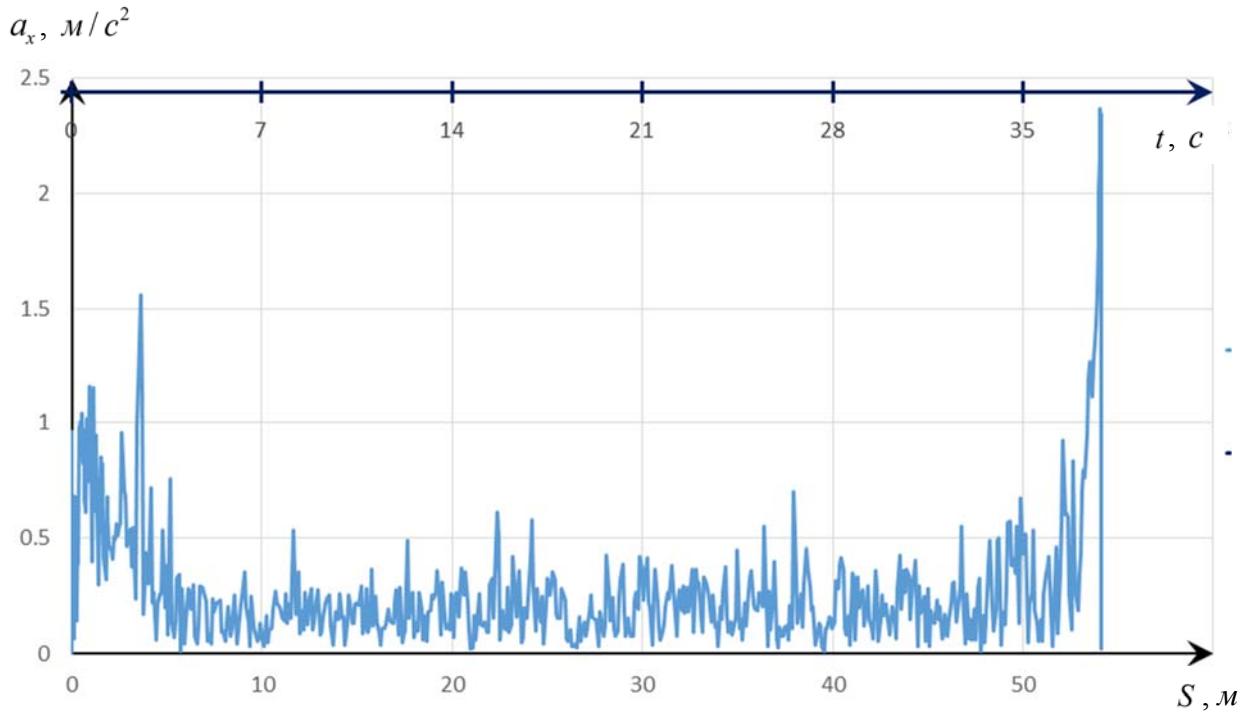


Рисунок 4.14 - Реализация значений продольных ускорений беспилотного АТС при выполнении маневра «Переставка  $S_{II} = 20$  м»

#### *Результаты выполнения маневра «Поворот $R_{II} = 16$ м»*

Манёвр «Поворот  $R_{II} = 16$  м» представляет собой движением беспилотного АТС в коридоре с заданным радиусом на заданной скорости.

На рис.4.15 представлена траектория движения беспилотного АТС «LADA-Калина» при выполнении маневра «Поворот  $R_{II} = 16$  м».

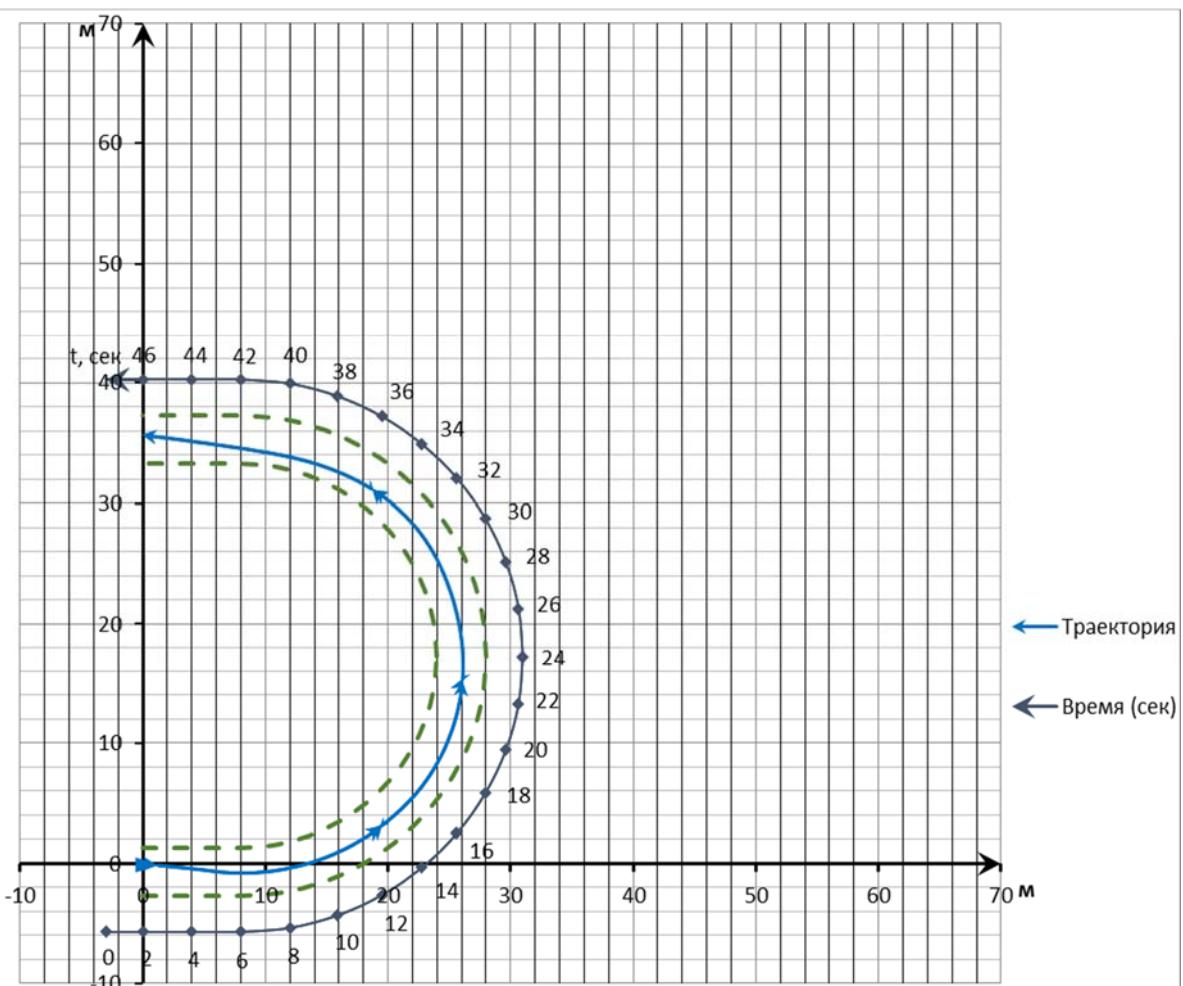


Рисунок 4.15 - Траектория движения беспилотного АТС в метрической системе координат, манёвр «Поворот  $R_{II} = 16 \text{ м}$ »

Траектория движения беспилотного АТС на графике обозначена синим цветом. Зеленым пунктиром обозначен коридор, размеченный конусами, внутри которого происходит движение беспилотного АТС.

Из анализа графика траектории движения следует, что беспилотное АТС «LADA-Калина» безопасно выполнило маневр на скорости  $10 \text{ км/ч}$ .

На рис. 4.16 представлен закон управления движением беспилотного АТС «LADA-Калина» при выполнении маневра «Поворот  $R_{II} = 16 \text{ м}$ ».

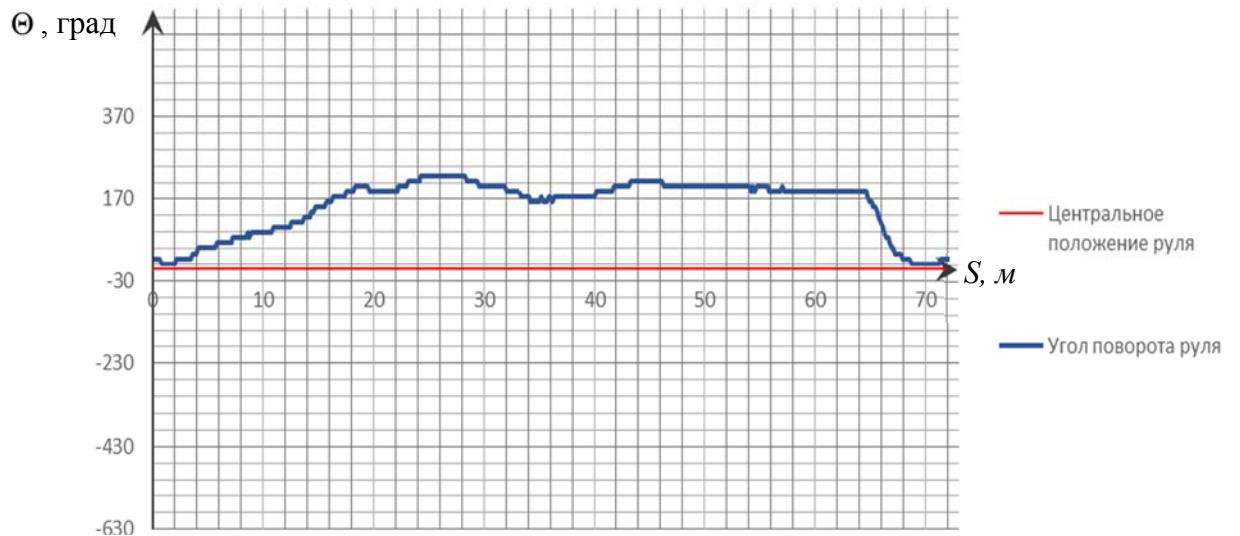


Рисунок 4.16 - Закон управления движением беспилотного АТС «LADA-Калина» при выполнении маневра «Поворот  $R_{II} = 16$  м»

На рис. 4.17 представлена реализация значений продольных ускорений беспилотного АТС при выполнении маневра «Поворот  $R_{II} = 16$  м».

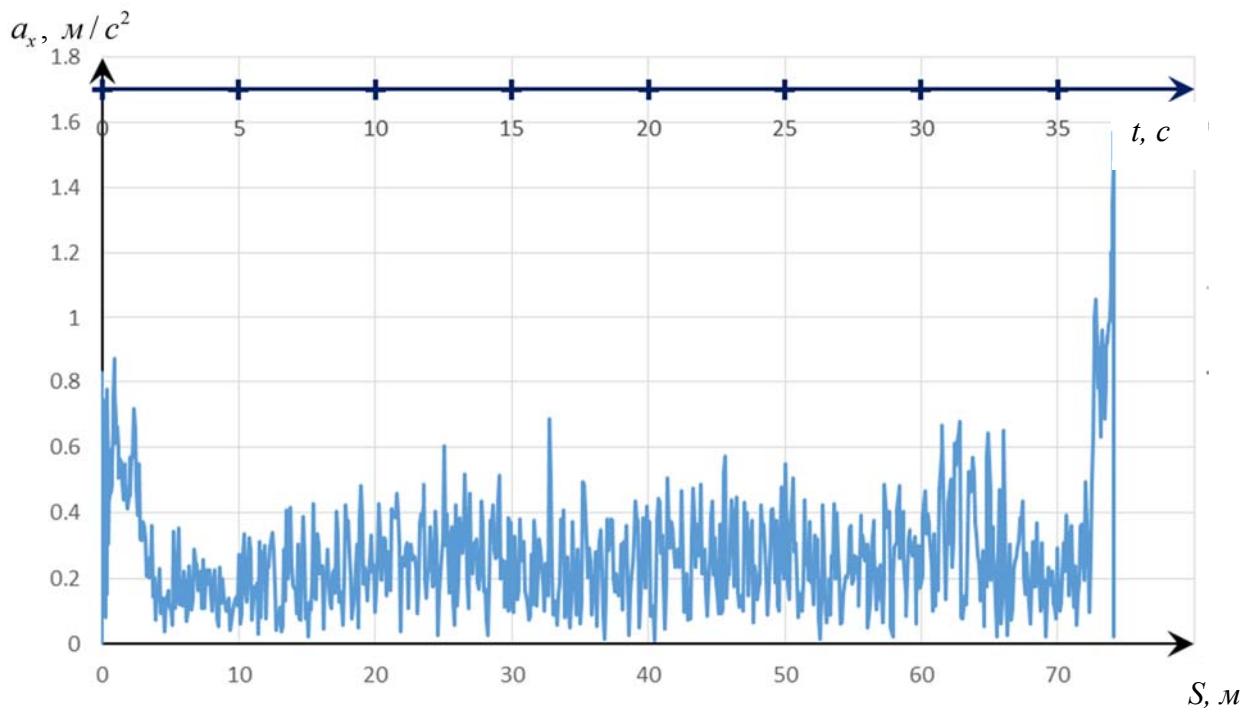


Рисунок 4.17 - Реализация значений продольных ускорений беспилотного АТС при выполнении маневра «Поворот  $R_{II} = 16$  м»

*Оценка адекватности математической модели криволинейного движения беспилотного АТС «LADA-Калина»*

На рис. 4.18 представлены траектории движения беспилотного АТС, полученные по результатам теоретического и экспериментального исследования выполнения маневра «Переставка  $S_{II} = 20$  м».

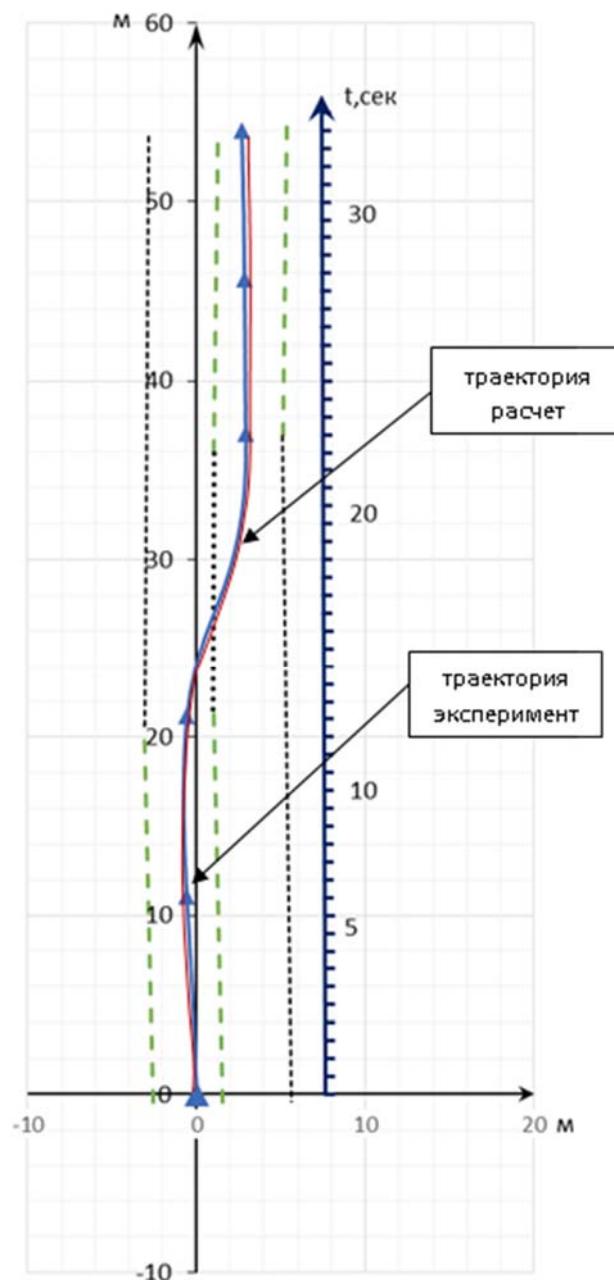


Рисунок 4.18 – Траектории движения беспилотного АТС при выполнении маневра «Переставка  $S_{II} = 20$  м», по результатам экспериментальных и теоретических исследований

Проведены сравнения результатов экспериментальных и теоретических исследований при выполнении маневра «Переставка  $S_{\Pi} = 20$  м», которые позволяют сделать вывод об адекватности предложенной модели криволинейного движения беспилотного АТС по ровному твердому опорному основанию и ее пригодности при прогнозировании характеристик криволинейного движения беспилотного АТС.

#### **4.5 Выводы**

Разработаны методики экспериментального исследования беспилотных АТС на ровном твердом опорном основании.

Разработан лабораторно-испытательный комплекс по исследованию характеристик криволинейного движения беспилотных АТС.

Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность разработанной математической модели и ее пригодность для прогнозирования характеристик криволинейного движения беспилотного АТС.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ:

1. На основе современных положений теории движения автомобиля разработана математическая модель, которая позволяет прогнозировать характеристики криволинейного движения беспилотного АТС. Особенностью модели является учет временных задержек при выработке и осуществлении управляющих воздействий на транспортное средство путем моделирования работы измерительной и вычислительной аппаратуры, а также исполнительных устройств.

2. Разработанная математическая модель является основой метода выбора рациональных параметров систем управления движением беспилотного АТС на стадии проектирования при выполнении типовых маневров и при движении по заданному маршруту. Суть метода заключается в последовательной реализации различной временной задержки управляющего сигнала на исполнительное устройство, воздействующее на рулевое колесо транспортного средства, с целью определения границы безопасного выполнения маневра.

3. С помощью имитационного математического моделирования динамики беспилотного АТС при выполнении типового маневра «Переставка  $S=20$  м» установлено:

- максимальная скорость выполнения маневра «Переставка  $S=20$  м» на опорном основании с максимальным коэффициентом сцепления – 0,8 для беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Калина» составила 94 км/ч;

- максимальные величины временных задержек управляющего сигнала на рулевое управление, позволившие осуществлять безопасное выполнение маневра «Переставка  $S=20$  м» на опорном основании с максимальным коэффициентом сцепления – 0,8 при различных скоростях движения

составили соответственно:  $V_{\max} = 94 \text{ км/ч}$  -  $\Delta t = 0,02 \text{ с}$ ;  $V_{\max} = 60 \text{ км/ч}$  -  $\Delta t = 0,37 \text{ с}$  ;  $V_{\max} = 40 \text{ км/ч}$  -  $\Delta t = 0,66 \text{ с}$ .

- максимальная скорость выполнения маневра «Переставка  $S=20 \text{ м}$ » на опорном основании с максимальным коэффициентом сцепления – 0,3 для беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Калина» составила 65 км/ч;

- максимальные величины временных задержек управляющего сигнала на рулевое управление, позволившие осуществлять безопасное выполнение маневра «Переставка  $S=20 \text{ м}$ » на опорном основании с максимальным коэффициентом сцепления – 0,3 при различных скоростях движения составили соответственно:  $V_{\max} = 65 \text{ км/ч}$  -  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $V_{\max} = 40 \text{ км/ч}$  -  $\Delta t = 0,31 \text{ с}$  ;  $V_{\max} = 20 \text{ км/ч}$  -  $\Delta t = 0,4 \text{ с}$ .

4. Получены следующие результаты при теоретических исследованиях движения беспилотного АТС по заданному маршруту в ограниченном коридоре:

- выбранная стратегия управления позволила обеспечить безопасное движение на всей протяженности трассы. Для прохождения участка трассы с поворотом  $90^\circ$  скорость беспилотного АТС должна быть снижена до 11 км/ч;
- определены максимальные величины временных задержек управляющего сигнала на рулевое управление, позволившие безопасно выполнить движение по заданному маршруту при различных скоростях движения составили соответственно:  $V_{\max} = 10 \text{ км/ч}$  -  $\Delta t = 0,64 \text{ с}$ ;  $V_{\max} = 5 \text{ км/ч}$  -  $\Delta t = 1,06 \text{ с}$ ;  $V_{\max} = 2 \text{ км/ч}$  -  $\Delta t = 1,47 \text{ с}$ .

5. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают адекватность разработанной математической модели и ее пригодность для прогнозирования характеристик криволинейного движения беспилотного АТС на базе серийного автомобиля «LADA-Kalina». Максимальное расхождение составляет не более 8%.

8. По результатам имитационного математического моделирования и экспериментальных исследований подтверждена обоснованность выбора конструктивных решений системы управления движением беспилотного АТС на базе «LADA-Kalina».

Система управления поворотом колес включает в себя исполнительное устройство, электронный блок управления, датчик скорости движения автомобиля, датчик оборотов двигателя; индикатор неисправности системы, червячный редуктор, датчик крутящего момента, коммутационные провода. В качестве актуатора использован стандартный электрический усилитель руля, через червячную передачу воздействующий на вал рулевого привода.

Реализованная система управления движением позволяет обеспечить требования по скорости безопасного выполнения маневров.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Google: сайт компании. Режим доступа: <http://www.google.com> (дата обращения: 31.07.2015).
2. RoboCV: сайт компании. Режим доступа: <http://robocv.ru> (дата обращения: 03.08.2015).
3. Volkswagen: сайт компании. Режим доступа: [http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/en/innovation/driver\\_assistance/Temporary\\_Auto\\_Pilot.html](http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/en/innovation/driver_assistance/Temporary_Auto_Pilot.html) (дата обращения 05.08.2015).
4. Audi: сайт компании. Режим доступа: <http://www.audi.com> (дата обращения 06.08.2015).
5. BMW: сайт компании. Режим доступа: <http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/connecteddrive/2013/index.html> (дата обращения 10.08.2015).
6. Cadillac: сайт компании. Режим доступа: <http://www.cadillac.com> (дата обращения 20.08.2015).
7. Volvo: сайт компании. Режим доступа: <http://www.volvocars.com/uk/top/about/news-events/pages/default.aspx> (дата обращения 21.08.2015).
8. DARPA: сайт компании. Режим доступа: <http://www.darpa.mil> (дата обращения 21.08.2015).
9. Matlab: сайт компании. Режим доступа: <http://matlab.ru/products/matlab> (дата обращения 23.08.2015).
10. NHTSA: сайт компании. Режим доступа: <http://www.nhtsa.gov> (дата обращения 30.08.2015).
11. New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO: сайт компании. Режим доступа: <http://www.nedo.go.jp> (дата обращения 31.08.2015).
12. VALTRA: сайт компании. Режим доступа: <http://www.valtra.ru/about-valtra.aspx> (дата обращения 02.09.2015).

13. FLANDERSMAKE: сайт компании. Режим доступа: <http://www.flandersmake.be> (дата обращения 03.09.2015).
14. Leica-geosystems: сайт компании. Режим доступа: <http://www.leica-geosystems.ru/ru/index.htm> (дата обращения 04.09.2015).
15. John Deere: сайт компании. Режим доступа: [http://www.deere.ru/ru\\_RU/regional\\_home.page](http://www.deere.ru/ru_RU/regional_home.page) (дата обращения 05.09.2015).
16. Аппаратное обеспечение беспилотной системы управления автомобилем с механической коробкой передач / Голь С.А., Нгуен Т.Н., Погудаев А.А. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. - 2013. - №4-3(46). - С. 12-18.
17. Реализация сценария «следуй за мной» беспилотной системы управления автомобилем-роботом на основе данных лидара и видеодатчика / Артёмкин В.В., Лукша С.С., Маликов А.Ю. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. - 2013. - №4-3(46). - С. 28-34.
18. Беспилотные автомобили становятся реальностью // Информатика и образование. - 2007. - №10. - С. 89-91.
19. Бортовая информационно-измерительная и управляющая система беспилотного автомобиля для циклических тестовых заездов / Нгуен Тuan Ngok диссертация кандидата технических наук : 05.11.16, 05.13.01 / Рязанская государственная радиотехническая академия. - Рязань, - 2014.
20. Открытая аппаратная платформа для тестирования программного обеспечения беспилотного автомобиля / Борисов А.Г., Голь С.А., Корнеев В.Е. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. - 2013. - №4-3(46). - С. 50-55.
21. Современное состояние разработок по созданию «беспилотных» автотранспортных средств за рубежом и в ФГУП «НАМИ» / Сайкин А.М., Ендачев Д.В., Холодилин И.В. // Труды НАМИ. - 2012. - №250. - С. 80-95.

22. Приводы управления «беспилотными» автотранспортными средствами / Сайкин А.М., Ендачев Д.В., Архипов А.В., Панфилов А.В. // Труды НАМИ. - 2012. - №250. - С. 96-113.
23. Технология «общения» дорожного транспорта / Петрусь И.П. // Интернет-журнал Науковедение. - 2014. - № 2. - С. 135.
24. Ветлинский В.Н., Осипов А.В. Автоматические системы управления движением автотранспорта. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 216 с.
25. Управление движением и техническое зрение автономных транспортных роботов. / Под редакцией Лупичева Л.Н. – М.: ИФТП, 1989. – 192 с.
26. Государственный стандарт РФ ГОСТ Р 50597-93 "Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения" (принят постановлением Госстандарта РФ от 11 октября 1993 г. N 221)
27. Аэродинамика автомобиля / Под ред. В.Г. Гухо. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
28. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин: Учеб. для студентов машиностроительных специальностей вузов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.: ил.
29. Антонов Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.
30. Пирковский Ю.В., Шухман С.Б. Теория движения полноприводного автомобиля (прикладные вопросы оптимизации конструкции шасси). – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 230 с.
31. Красненьков В.И. Основы теории управляемости транспортных гусеничных машин. – М.: МВТУ, 1977. – 82 с.
32. Эллис Д.Р. Управляемость автомобиля: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
33. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.

34. Дик А.Б. Расчет стационарных и нестационарных характеристик тормозящего колеса при движении с уводом: Дис. канд. техн. наук. – Омск.: САДИ, 1988. – 224 с.
35. Рождественский Ю.Л., Машков К.Ю. О формировании реакций при качении упругого колеса по недеформируемому основанию // Труды МВТУ. – 1982. – № 390. – С. 56-64.
36. Костин А. К., Пугачев Б. П., Kochinov Ю. Ю. Работа дизелей в условиях эксплуатации. – Л.: Машиностроение, 1989. – 284 с.
37. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / Под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 286 с.
38. Савочкин В.А., Дмитриев А.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин – М.: Машиностроение, 1993. – 320с.
39. ГОСТ Р 52302-2004. Автомобильные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 31 с.
40. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 167 с.
41. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. – [www.exponenta.ru](http://www.exponenta.ru).
42. E. Frazzoli, M. A. Dahleh, and E. Feron. Real-time motion planning for agile au-tonomous vehicles. AIAA J. Guid. Control, vol. 25, no. 1, pp. 116–129, 2002.
43. Y. Kuwata, J. Teo, S. Karaman, G. Fiore, E. Frazzoli, and J. P. How. Motion planning in complex environments using closed-loop prediction, presented at the AIAA Guid., Nav., Control Conf. Exhibit, Honolulu, HI, Aug. 2008, AIAA-2008-7166.
44. Michael A. Johnson, Mohammad H. Moradi. PID Control, 2005.
45. 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.

46. John T. Betts. Practical Methods for Optimal Control and Estimation Using Non-linear Programming.

47. Huaiquan ZANG, Shuanyong CHEN. Electric Power Steering Simulation Analyze Based on Fuzzy PID Current Tracking Control. Journal of Computational Information Systems, January, 2011.

48. Xin Li, Xue-Ping Zhao, Jie Chen. Controller Design for Electric Power Steering System Using T-S Fuzzy Model Approach. International Journal of Automation and Computing, May 2009.

49. Qin Zhang. A generic fuzzy electrohydraulic steering controller for off-road vehicles, 2003.

50. John Leonard, Jonathan How, Seth Teller. A Perception-Driven Autonomous Urban Vehicle, journal of Field Robotics, 1–48 (2008).

51. 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.

52. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology. IEEE Transactionson Control Systems, Technology. 2005, Vol. 13. No. 4. P. 559-576.

53. 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.

54. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. Trans, ASME. 1942. Vol. 64. P. 759-768.

55. O'Dwyer A. PID compensation of time delayed processes 1998-2002: a survey. Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado, 4-6 June, 2003. P. 1494-1499.
56. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control. Proceedings of the IFAC Workshop, Eds., Terrassa, Spain, 5-7 Apr. 2000.
57. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006, 460 p.
58. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine. Feb.2006. P. 41-54.
59. O. Amidi and C. Thorpe W.H. Chun and W.J. Wolfe, Eds. Integrated mobile robot control.in Proc. SPIE, Boston, MA, Mar. 1991, vol.1388, pp. 504–523.
60. S. Park, J. Deyst, and J. P. How. Performance and Lyapunov stability of a nonlin-ear path-following guidance method," J. Guid., Control, Dyn., vol. 30, no. 6, pp. 1718–1728, Nov. 2007.
61. John Leonard, Jonathan How. A Perception-Driven Autonomous Urban Vehicle
62. Kelly, A., & Stentz, A. An approach to rough terrain autonomous mobility. In 1997 International Conference on Mobile Planetary Robots, Santa Monica, CA.
63. Maxim Likhachev, Dave Ferguson, Geoff Gordon, Anthony Stentz, and Sebastian Thrun. Anytime Dynamic A\*: An Anytime, Replanning Algorithm.
64. S.M. LaValle. Planning Algorithms Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2006
65. Rudolph van der Merwe and Eric A. Wan. The Square-Root Unscented Kalman Filter for State and Parameter-Estimation.2001.
66. Применение ансцентного 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.

67. Dubins LE. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. American Journal of Mathematics. 1957 1;79:497~516.
68. J.A. Reeds, R. A. Shepp. Optimal paths for a car that goes both forward and backward, Pacific Journal of Mathematics, vol. 145(2), 1990.
69. H.J. Sussmann, W. Tang. Shortest paths for the Reeds-Shepp car: a worked out example of the use of geometric techniques in nonlinear optimal control, Report SYCON-91-10, Rutgers Univ., 1991.
70. Minas AC, Urrutia S. Discrete Optimization Methods to Determine Trajectories for Dubins' Vehicles. Electronic Notes in Discrete Mathematics. 2010 1;36:17-24.
71. Hota S, Ghose D. A. Modified Dubins Method for Optimal Path Planning of a Miniature Air Vehicle Converging to a Straight Line Path. American Control Conference; 1; St. Louis, MO, USA 2009, pp. 2397-402.
72. LaValle S. M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. TR 98-11, Computer Science Dept., Iowa State University, October 1998,
73. Dolgov, D.; Thrun, S.; Montemerlo, M. &Diebel, J. Path Planning for Autonomous Vehicles in Unknown Semi-structured Environments. I. J. Robotic Res., 29, 485-501., 2010.
74. KuwataY. et al. Real-time Motion Planning with Applications to Autonomous Urban Driving, 2009
75. Dubins, L.E. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. American Journal of Mathematics 79 (3): 497–516, July 1957.
76. Andy Giese. A Comprehensive, Step-by-Step Tutorial on Computing Dubin's Curves, October 1, 2012.
77. Veldhuizen T.J. Yaw rate feedback by active rear wheel steering, July, 2007.
78. Jorge G. F. A Vehicle Dynamics Model for Driving Simulators, Sweden 2012.

80. Dennis J. Plank. Vehicle to vehicle comparison of the tire and chassis dynamics, 2007.
81. Kutluk B.A. Identification of handling models for road vehicles, march 2008.
82. Wang and Qi. Trajectory Planning for a Four-Wheel-Steering Vehicle, 2001.
83. Guldner, Tan. Analysis of automatic steering control for highway vehicles with look-down lateral reference system -, et al. – 1996
84. Rajesh Rajamani. Vehicle Dynamics and Control, 2006.
85. David Fofi, Fawzi Nashashibi. Contributions to the use of 3D lidars for autonomous navigation: calibration and qualitative localization, 2012.
86. Носков В.П, Ханин А.А. Комплексирование светолокационных и телевизионных данных в задачах выделения дороги.
87. Laser Measurement Systems- LMS200/211/221/291, 2006.
88. D. Martín, D.M. Guinea, M.C. García-Alegre, E. Villanueva, D. Guinea. Fuzzy steering control of a hydraulic tractor and laser perception in obstacle avoidance strategies, Madrid, Spain, 2010.
89. R. E. Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. 1960.
90. Eric A. Wan and Rudolph van der Merwe. The Unscented Kalman Filter for Non-linear Estimation. 2000.
91. S. Julier and J. Uhlmann. Unscented filtering and nonlinearestimation. //Proc. IEEE. Vol. 92. No. 3. Pp.401 – 422. 2004 .
92. Simon J. Julier, Jeffrey K. Uhlmann. A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems. 1997.
93. Rudolph van der Merwe and Eric A. Wan. Sigma-Point Kalman Filters for Inte-grated Navigation. 2004.

«Утверждаю»

Первый проректор–  
проректор по учебной работе

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Б.В. Падалкин

« 31 » мая 2016 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ  
результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Комиссия в составе: председателя – заведующего кафедрой «Колесные машины» д.т.н., профессора Котиева Г.О. и членов – председателя методической комиссии ф-та «Специальное машиностроение», профессора кафедры «Колесные машины», д.т.н. Зузова В.Н., заместителя заведующего кафедрой «Колесные машины» по учебно-методической работе, профессора кафедры «Колесные машины», д.т.н. Жилейкина М.М. составила настоящий акт о том, что полученные в диссертационной работе **«ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ»**, выполненной на соискание ученой степени кандидата технических наук сотрудником ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» Ендачевым Д.В., результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе на кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана при чтении лекций и проведении лабораторных и семинарских занятий по следующим курсам:

- «МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ КОЛЕСНЫХ МАШИН»;
- «ДИНАМИКА КОЛЕСНЫХ МАШИН».

Председатель комиссии:  
заведующий кафедрой «Колесные машины»  
д.т.н., профессор

  
Котиев Г.О.

Члены комиссии:

Председатель методической комиссии  
ф-та «Специальное машиностроение»  
д.т.н., профессор



Зузов В.Н.

Заместитель заведующего кафедрой  
«Колесные машины» по учебно-методической работе  
работе д.т.н., профессор



Жилейкин М.М.

«Утверждаю»



Директор НИИ «Специальное  
машиностроение» (НИИСМ)

МГТУ им. Н.Э. Баумана

В.Н. Зимин  
06  
2016 г.

АКТ

о реализации результатов диссертационной работы на тему  
**«ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ»**, выполненной на соискание  
ученой степени кандидата технических наук сотрудником  
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» Ендачевым Д.В.

Комиссия в составе: председателя – заведующего отделом СМЗ-2 НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н. Бутарович Д.О. и членов – ведущего научного сотрудника отдела СМЗ-2 НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана д.т.н. Жилейкина М.М., старшего научного сотрудника отдела СМЗ-2 НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана к.т.н. Дьякова А.С., составили настоящий акт о том, что материалы диссертационной работы Ендачева Д.В., а именно:

- математическая модель криволинейного движения беспилотного транспортного средства по ровному горизонтальному недеформируемому опорному основанию, пригодная для исследования влияния временных задержек в системах привода органов управления на безопасность движения;
  - результаты теоретических исследований криволинейного движения беспилотного АТС при заданных управляющих воздействиях при различных временных задержках,
- используются в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана в отделе СМЗ-2 при разработке перспективных колесных транспортных средств.

Председатель комиссии:

к.т.н.

Бутарович Д.О.

Члены комиссии:

д.т.н., в.н.с.

Жилейкин М.М.

к.т.н., с.н.с.

Дьяков А.С.