



**«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Факультет «Автомобильный транспорт»
Кафедра «Автомобили»

Допустить к защите
Зав. Кафедрой Иванов А. М.
«___» июня 2021 г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

выпускной квалификационной работы магистра
по направлению подготовки

Наземные транспортно-технологические комплексы (23.04.02)

Профиль «Исследования и испытания наземных транспортно-
технологических машин»

**на тему: «Разработка цифрового двойника экспериментального
высокоавтоматизированного транспортного средства»**

Руководитель: _____ / Шадрин Сергей Сергеевич, д.т.н., профессор

Студент: _____ / Маклаков Никита Александрович, группа 2МИМ

Москва 2021

**МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)**

Кафедра Автомобили

Шифр и направление подготовки / специальность: Наземные транспортно-технологические комплексы (23.04.02)

направленность (профиль) / специализация: Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин

УТВЕРЖДАЮ

Зав. Кафедрой Иванов А. М.

« ____ » июня 2021 г.

ЗАДАНИЕ

НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Маклаков Никита Александрович

(фамилия, имя, отчество полностью)

Тема ВКР «Разработка цифрового двойника экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства»

утверждена приказом МАДИ от « ____ » _____ 20__ г. № _____

1. Исходные данные по ВКР: Протокол данных автомобиля Chevrolet Orlando, характеристики, протокол испытаний, периодические издания, 3D-модель физического объекта, Интернет – ресурс, диссертационные исследования.
2. Обоснование темы ВКР и перечень, подлежащих разработке вопросов:

Цель исследования

Целью исследования выпускной квалификационной работы является разработка цифрового двойника экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий ряд задач, который является важнейшим этапом при разработке высокоинтеллектуальной технологии:

1. Разработка 3D-модели физического объекта транспортного средства Chevrolet Orlando 1.8 6AT 2012;
2. Импорт 3D-модели в инструмент «Model Preparation Tool» программной среды «Simcenter Prescan»;

3. Настройка технических и динамических характеристик загружаемой модели для воссоздания точной копии реального объекта;
4. Разработка программы испытаний и проектирования траектории движения для цифрового двойника;
5. Проведение виртуальных испытаний в программной среде «Simcenter Prescan»;
6. Обработка полученных результатов виртуальных испытаний в программной среде «MATLAB&Simulink»;
7. Проведение натурных испытаний на автополигоне «МАДИ»;
8. Обработка полученных результатов натурных испытаний в программных средах «imc FAMOS», «Garmin BaseCamp»;
9. Сравнение результатов натурных и виртуальных испытаний, формирование научных выводов;
10. Разработка топологии сбора данных взаимодействия умных автомобилей с контролирующими органами.

№ п/п	Наименование этапа работы (раздела)	Ф.И.О. должность, уч. степень, звание руководителя / консультанта (этапа работы раздела)	Срок выполнения этапа, раздела	Подпись, дата	
				Задание выдал	Задание принял
1	Обзор и анализ научно-технической литературы	Шадрин Сергей Сергеевич	15.03.2021	11.02.2021	15.03.2021
2	Разработка цифрового двойника «Chevrolet Orlando»	Шадрин Сергей Сергеевич	31.03.2021	11.02.2021	31.03.2021
3	Проведение виртуальных испытаний цифрового двойника	Шадрин Сергей Сергеевич	12.05.2021	11.02.2021	12.05.2021
4	Проведение дорожных испытаний физического объекта	Шадрин Сергей Сергеевич	14.05.2021	11.02.2021	14.05.2021
5	Проверка адекватности математической модели	Шадрин Сергей Сергеевич	20.05.2021	11.02.2021	20.05.2021
6	Разработка топологии сбора данных	Шадрин Сергей Сергеевич	08.06.2021	11.02.2021	08.06.2021
7	Подготовка презентационных материалов	Шадрин Сергей Сергеевич	18.06.2021	11.02.2021	18.06.2021
8	Защита дипломного проекта	Шадрин Сергей Сергеевич	29.06.2021	11.02.2021	29.06.2021

Руководитель ВКР: _____/Шадрин Сергей Сергеевич

Задание принял к исполнению _____/Маклаков Никита Александрович

АННОТАЦИЯ

Автор расчетно-пояснительной записки: Маклаков Никита Александрович.

Руководитель: Шадрин Сергей Сергеевич.

Выпускная квалификационная работа на тему: «Разработка цифрового двойника экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства».

При написании расчетно-пояснительной записки использовался следующий перечень программных продуктов:

1. Autodesk 3ds Max 2021;
2. MATLAB&Simulink;
3. Microsoft Excel;
4. Microsoft Power Point;
5. Microsoft Visio;
6. Microsoft Word;
7. Movavi Video Editor Plus 2021;
8. Siemens Simcenter Prescan.

Расчетно-пояснительная записка включает в себя 6 разделов. Разделы в свою очередь разбиты на подразделы согласно оглавлению.

Расчетно-пояснительная записка состоит из 160 страниц и содержит 35 таблиц, 119 рисунков, 3 листингов, 1 формулы, 1 приложения и 15 слайдов электронной презентации.

Основной целью дипломного проекта является разработка виртуального двойника транспортного средства в специализированных программных продуктах, включая 3D-модель и динамику поведения на основе динамических характеристик и инженерных расчетов.

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	4
СОДЕРЖАНИЕ.....	5
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	8
ВВЕДЕНИЕ	9
ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	12
1.1 Автономное транспортное средство	12
1.1.1 Используемые технологии	13
1.1.2 Уровни автоматизации транспортных средств (классификация).....	16
1.1.3 Преимущества и недостатки автоматизированного транспортного средства	19
1.2 Технология «Цифровой двойник»	21
1.2.1 Типы «Цифрового двойника»	22
1.2.2 Цели и задачи технологии «Цифровой двойник»	23
1.2.3 Уровни виртуального представления технологии	25
1.2.4 Применение технологии «Цифровой двойник» АТС в эксплуатации.....	27
1.2.4.1 Пример структурной схемы математической модели автомобиля	28
1.2.5 Разработка геометрической 3D-модели физического двойника (автомобиля)...	29
1.2.6 Концепция программного обеспечения с использованием технологии «Цифровой двойник»	31
1.2.6.1 Блок «Анализ»	32
1.2.6.2 Блок «Планирование»	32
1.2.6.3 Блок «Разработка».....	32
1.2.6.4 Блок «Взаимодействие».....	32
1.2.6.5 Блок «Тестирование»	33
1.2.6.6 Блок «Внедрение и сопровождение».....	33
1.3 Прогнозируемое обслуживание транспортного средства «Predictive maintenance»	34
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА «CHEVROLET ORLANDO» В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ «SIEMENS PRESCAN»	38
2.1 Разработка 3D-модели цифрового двойника «Chevrolet Orlando» в программной среде «Autodesk 3ds Max 2021»	39
2.2 Исходные данные модели цифрового двойника в «Siemens Prescan»	43
2.2.1 Блок «Canvas Data»	43
2.2.2 Блок «Vehicle Dynamics»	45
2.2.2.1 Damping – параметризация демпфирования колес автомобиля	45
2.2.2.2 Stiffness – параметризация жесткости колес автомобиля.....	46
2.2.2.3 Dynamics.....	46
2.2.2.4 DriveLine	48
2.2.2.5 Engine	50
2.2.2.6 Steering	50
2.2.2.7 Physics.....	51
2.2.3 Блок «Wheels».....	51
2.2.4 Блок «Joints»	52
2.2.5 Блок «JointGroups»	53

2.3 Проектирование экспериментальных дорожных испытаний в программной среде «Simcenter Prescan».....	55
2.3.1 Настройка параметров визуализации и сбора данных	55
2.3.2 Импорт эксперимента в «MATLAB&Simulink».....	56
2.3.2.1 Блок «SELF_Demux».....	58
2.3.2.2 Блок «Dynamics_Simple_3D»	59
2.3.3 Разработка модели инициализации данных	62
2.3.3.1 Модуль сбора данных	62
2.3.3.2 Определение пройденного пути	66
2.3.3.3 Обработка экспериментальных данных	68
ГЛАВА 3 ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА	73
3.1 Объект испытаний	73
3.2 Проектирование испытаний	73
3.2.1.1 Программа испытаний	73
3.3 Протокол полигонных испытаний	76
3.4 Обработка экспериментальных данных виртуальных испытаний	76
3.4.1 Испытание «Змейка».....	77
3.4.1.1 Дорожный заезд №1 при скорости движения транспортного средства 10 км/ч	77
3.4.1.2 Дорожный заезд №2 при скорости движения транспортного средства 15 км/ч	79
3.4.1.3 Дорожный заезд №3 при скорости движения транспортного средства 20 км/ч	81
3.4.1.4 Дорожный заезд №4 при скорости движения транспортного средства 30 км/ч	84
3.4.1.5 Дорожный заезд №5 при скорости движения транспортного средства 40 км/ч	87
3.4.2 Испытание «Разгон и торможение»	89
3.4.2.1 Дорожный заезд №1 при достижении скорости транспортного средства 50 км/ч	89
3.4.2.2 Дорожный заезд №2 при достижении скорости транспортного средства 60 км/ч	91
3.4.3 Испытание «Выруливание от препятствия»	94
3.4.3.1 Дорожный заезд при фиксированном угле рулевого колеса.....	94
ГЛАВА 4 ДОРОЖНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА «CHEVROLET ORLANDO».....	97
4.1 Объект испытаний	97
4.2 Измерительное и регистрирующее оборудование	100
4.3 Регистрируемые показатели	102
4.4 Программа испытаний	103
4.4.1 Испытание «Змейка».....	105
4.4.2 Испытание «Разгон и торможение»	106
4.4.3 Испытание «Выруливание от препятствия»	106
4.5 Протокол полигонных испытаний	108
4.6 Обработка экспериментальных данных	110
4.6.1 Испытание «Змейка».....	110
4.6.1.1 Определение местоположения конусов для испытания «Змейка».....	110
4.6.1.2 Дорожный заезд №1 при скорости движения транспортного средства 10 км/ч	111
4.6.1.3 Дорожный заезд №2 при скорости движения транспортного средства 15 км/ч	113
4.6.1.4 Дорожный заезд №3 при скорости движения транспортного средства 20 км/ч	115
4.6.1.5 Дорожный заезд №4 при скорости движения транспортного средства 30 км/ч	118

4.6.1.6 Дорожный заезд №5 при скорости движения транспортного средства 40 км/ч	119
4.6.2 Испытание «Разгон и торможение»	122
4.6.2.1 Дорожный заезд №1 при достижении скорости транспортного средства 50 км/ч ...	122
4.6.2.2 Дорожный заезд №2 при достижении скорости транспортного средства 60 км/ч ...	125
4.6.3 Испытание «Выруливание от препятствия»	130
4.6.3.1 Дорожный заезд при фиксированном угле рулевого колеса.....	130
ГЛАВА 5 ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	132
5.1 Сравнение результатов натуральных и виртуальных испытаний	132
5.1.1 Испытание «Змейка».....	132
5.1.1.1 Дорожный заезд №1 при скорости движения транспортного средства 10 км/ч	132
5.1.1.2 Дорожный заезд №2 при скорости движения транспортного средства 15 км/ч	132
5.1.1.3 Дорожный заезд №3 при скорости движения транспортного средства 20 км/ч	133
5.1.1.4 Дорожный заезд №4 при скорости движения транспортного средства 30 км/ч	133
5.1.1.5 Дорожный заезд №3 при скорости движения транспортного средства 40 км/ч	134
5.1.2 Испытание «Разгон и торможение»	134
5.1.2.1 Дорожный заезд №1 при достижении скорости транспортного средства 50 км/ч ...	134
5.1.2.2 Дорожный заезд №2 при достижении скорости транспортного средства 60 км/ч ...	135
5.1.3 Испытание «Выруливание от препятствия».....	136
5.2 Заключение о показателях точности	136
ГЛАВА 6 ТОПОЛОГИЯ СБОРА ДАННЫХ	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	139
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А	146

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- МРТ - Model Preparation Tool
- АТС - Автоматизированное транспортное средство;
- ВКР - Выпускная Квалификационная Работа;
- ДТП - Дорожно-транспортное происшествие;
- ПО - Программное обеспечение
- ТО - Техническое обслуживание;
- ТС - Транспортное средство;
- ЦД - Цифровой двойник;
- ЧС - Чрезвычайная ситуация;
- ЭБУ - Электронный блок управления

ВВЕДЕНИЕ

Высокоавтоматизированные транспортные средства занимают высокое влияние как в IT-сфере, так и в машиностроении. Однако следует брать во внимание тот факт, что реализация взаимодействия автоматизированного транспортного средства (Далее – АТС) с окружающим миром довольно сложный процесс, который нуждается в постоянном контроле со стороны человека. Сегодня современные беспилотные автомобили не взаимодействуют напрямую с инфраструктурой. В большинстве случаев тестовые беспилотные транспортные средства (Далее – ТС) появляются на дорогах общего пользования лишь под пристальным контролем водителя-испытателя высокого уровня, который не позволит совершить чрезвычайную ситуации (Далее – ЧС).

Производство и эксплуатация безопасных АТС является важнейшим этапом развития машинного обучения и IT-сферы в рамках беспилотных устройств. Немало важным являются так же блоки анализа алгоритма – машинного обучения, проектирования, оптимизации, надежности будущей конструкции, стендовых и натурных испытаний итогового продукта. Для оптимизации данных процессов и сокращения времени и затрат на разработку приемлемо внедрять технологию «Цифровой двойник» (Далее – «ЦД»).

Цифровой двойник может применяться на всех жизненных циклах продукта, от концепции и разработки модели, прогнозирования и оптимизации до систем производства и дальнейшей эксплуатации.

Технология может применяться абсолютно во всех сферах влияния, где необходим более подробный контроль над объектом / производством продукта. Благодаря внедрению цифрового двойника появится возможность разработать прототип идеального изделия вне зависимости от сферы его использования.

Немаловажным фактором внедрения технологии является разработка топологии взаимодействия умных автомобилей с контролирующими органами, такими как: ГИБДД, ЦОДД, налоговые службы, СТО, страховые

компаний, автомобильные производители, автодилеры, транспортные агрегаторы, органы сертификации и др. Предполагается разработка единой системы сбора данных внедряемой технологии и дальнейшая эксплуатация умных транспортных средств на дороги общего пользования.

Цель исследования

Целью исследования выпускной квалификационной работы является разработка цифрового двойника экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий ряд задач, который является важнейшим этапом при разработке высокоинтеллектуальной технологии:

1. Разработать 3D-модель физического объекта транспортного средства Chevrolet Orlando 1.8 6AT 2012;
2. Импортировать 3D-модель в инструмент «Model Preparation Tool» программной среды «Simcenter Prescan»;
3. Настроить технические и динамические характеристики загружаемой модели для воссоздания точной копии реального объекта;
4. Разработать программу испытаний и спроектировать траекторию движения для цифрового двойника;
5. Провести виртуальные испытания в программной среде «Simcenter Prescan»;
6. Обработать полученные результаты виртуальных испытаний в программной среде «MATLAB&Simulink»;
7. Провести натурные испытания на автополигоне «МАДИ»;
8. Обработать полученные результаты натурных испытаний в программных средах «imc FAMOS», «Garmin BaseCamp»;
9. Сравнить результаты натурных и виртуальных испытаний, сформировать научный вывод;

10.Разработать топологию сбора данных взаимодействия умных автомобилей с контролирующими органами.

Апробация работы

Основные положения выпускной квалификационной работы были доложены и обсуждены на международной конференции «Наука и техника в дорожной отрасли» (Москва, 2021).

Глава 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

В отчете по практической работе «Исследование и перспективы развития беспилотных автомобилей в России» были использованы положения об автономном транспортном средстве в целом [35].

В своей преддипломной практической работе «Разработка цифрового двойника экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства» были описаны основные положения технологии «Цифровой двойник», а также технологии прогнозируемого обслуживания транспортного средства [36].

1.1 Автономное транспортное средство

В своей работа по практике «Исследование и перспективы развития беспилотных автомобилей в России» были использованы положения об автономном транспортном средстве в целом [35]

Беспилотный автомобиль – транспортное средство, оборудованное системой автоматического управления, которое может свободно передвигаться по дорогам без участия водителя, либо с частичным участием.

Беспилотное авто имеет способность самостоятельно передвигаться благодаря программному обеспечению, а также сенсорам, установленные на автомобиле. Программное обеспечение позволяет считывать данные со всех систем автомобиля: нажатие газа и тормоза, поворота руля, смены передачи, переключения внешних световых приборов и др. Сенсоры, в свою очередь, собирают данные об окружающей обстановке и являются неотъемлемой частью беспилотного автомобиля.

Также в программное обеспечение автономного транспортного средства может входить машинное зрение и нейронные сети.



Рисунок 1. Высокоавтоматизированный автомобиль будущего

Перед тем, как беспилотное транспортное средство тронется с точки старта, водитель устанавливает пункт назначения. Программное обеспечение автомобиля обрабатывает входную информацию и рассчитывает маршрут, после чего начинает движение по проложенному пути. На протяжении всей поездки в режиме реального времени программное обеспечение обрабатывает информацию с сенсоров. Вращающийся, установленный на крыше датчик ЛИДАР контролирует заданный диапазон вокруг автомобиля и создает динамическую трехмерную карту текущей окружающей среды. Радарные системы в переднем и заднем бамперах рассчитывают расстояния до препятствий.

1.1.1 Используемые технологии

Для обнаружения окружения беспилотные автомобили используют различные методы: лидарные датчики, радарные датчики, датчики положения, ультразвуковые датчики, видеокамеры, GPS-системы, одометры, компьютерное зрение. Также транспортные средства имеют системы управления, которые способны анализировать и обрабатывать данные из сенсоров. Это необходимо для видимости различных транспортных средств на дорогах. В свою очередь, железная составляющая (блок управления) беспилотного автомобиля анализирует и обрабатывает переданную информацию из вышеописанных систем. После обработки данных

программный софт планирует безопасную и комфортную поездку к желаемому месту назначения.

Основными системами автоматизированного транспортного средства являются:

1. Лидарные датчики

Лидарные датчики работают с помощью лазеров, которые обнаруживают объекты и измеряют их расстояние и скорость относительно транспортного средства в режиме реального времени. Помимо этого, лидар позволяет создавать трехмерные изображения обнаруженных объектов и наносить на карту окрестности. Также, есть возможность настроить лидар на создание полной 360 – градусной карты вокруг транспортного средства, а не полагаться на узкое поле зрения.



Рисунок 2. Лидарный датчик

2. Радарные датчики

Радар позволяет оценить взаимную скорость объекта и транспортного средства, используя электромагнитные волны. Во время измерения он посылает сигнал, а затем ждет, пока он будет отправлен обратно. По сравнению с лидаром, радар использует большую длину волны и меньшую энергию сигнала. Однако не способен описать форму сканируемого пространства.

3. Датчик положения

Датчик положения – устройство, определяющее положение беспилотного транспортного средства на карте вплоть до его координат.

4. Ультразвуковые датчики

Ультразвуковые датчики установлены на различных сторонах транспортного средства для обнаружения объектов, близких к транспортному средству или измерения положения других транспортных средств во время парковки. Датчики обеспечивают помощь при парковке, предупреждении о столкновении, выезда на полосу движения и др.

5. Видеокамеры

Видеокамеры установлены в верхней части переднего стекла, рядом с зеркалом заднего вида. Они позволяют строить в реальном времени 3D-изображение дороги впереди транспортного средства. Используются для обнаружения светофоров, дорожных знаков, неожиданных объектов, таких как животные, пешеходы. Позволяют обнаружить различные знаки дорожного движения, такие как «Стоп», «Пешеходный переход» и др.

6. GPS

GPS – космическая спутниковая навигационная система, предоставляющая текущую информацию о местоположении и времени в любой точке Земли, где есть беспрепятственная линия видимости для четырех или более спутников. GPS – основа всех карт, которые использует транспортное средство во время движения.

7. Управляющий компьютер

Управляющий компьютер. Данные, полученные от каждой сенсорной системы, поступают на управляющий компьютер, который обрабатывает эти данные с высокой скоростью. Центральный компьютер - мощный процессор, установленный внутри транспортного средства. С помощью высокоразвитого программного обеспечения принимает требуемое решение и направляет выходной сигнал на электромеханические агрегаты. Определяет траекторию движения транспортного средства, реагирует на ситуацию на дорогах: движение других участников дорожного движения, автомобилей, пешеходов,

погодные условия, резкие повороты, неровности. Компьютер также подключен к интернету и системе GPS для обеспечения мониторинга и обновления в режиме реального времени.

Компоненты системы для автоматизированного передвижения беспилотного транспортного средства представлены на Рисунок 3.

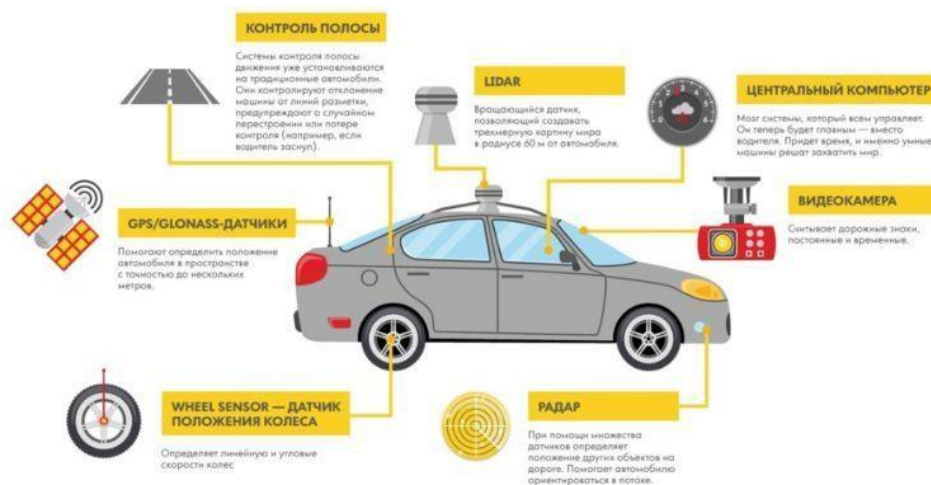


Рисунок 3. Компоненты беспилотного автомобиля

1.1.2 Уровни автоматизации транспортных средств (классификация)

Каждому транспортному средству выделяют свой уровень автоматизации.

Система классификации основана на шести различных уровнях (от неавтоматизированной до полностью автоматизированной системы). Данная система классификации основана не на возможностях транспортного средства, а на количестве вмешательств со стороны водителя и требуемой внимательности.

Уровни автоматизации транспортного средства представлены в (Таблица 1):

Таблица 1. Уровни автоматизации транспортных средств

SAE уровень	Наименование режима	Описание режима	Рулевое управление, газ/тормоз	Мониторинг внешней среды	Управление транспортным средством в экстренных случаях	Возможности системы (Режимы вождения)
Водитель следит за обстановкой вождения						
1	Отсутствие автоматизации	Полное управление автомобилем осуществляет водитель	Водитель	Водитель	Водитель	Недоступен
2	Помощь водителю	Полное управление автомобилем осуществляет водитель с возможностью использования информационной поддержки электронной системы помощи водителю	Водитель + система	Водитель	Водитель	Некоторые режимы вождения
3	Частичная автоматизация	Одна из систем управления (газ/тормоз, рулевое) может быть автоматизирована по желанию водителя	Система	Водитель	Водитель	Некоторые режимы вождения
Автоматизированная система управления отслеживает условия вождения						
4	Условная автоматизация	Управление автомобилем осуществляет система автоматического управления автомобилем при условии, что водитель будет полностью	Система	Система	Водитель	Некоторые режимы вождения

SAE уровень	Наименование режима	Описание режима	Рулевое управление, газ/тормоз	Мониторинг внешней среды	Управление транспортным средством в экстренных случаях	Возможности системы (Режимы вождения)
		контролировать систему и, при необходимости, вмешиваться в процесс управления				
5	Высокая автоматизация	Управление автомобилем осуществляет система автоматического управления автомобилем, даже если водитель будет ненадлежащим образом вмешиваться в процесс управления	Система	Система	Система	Некоторые режимы вождения
6	Полная автоматизация	Полное управление автомобилем осуществляет система автоматического управления автомобилем	Система	Система	Система	Все режимы вождения

1.1.3 Преимущества и недостатки автоматизированного транспортного средства

- Использование беспилотных автомобилей позволило бы получить глобальные преимущества, такие как:
- Уменьшение дорожно-транспортных происшествий и столкновений (в результате которых гибнут люди, травмируются и несут расходы);
- Увеличение пропускной способности проезжей части и уменьшение заторов на дорогах в связи с уменьшением потребности в проблемах в безопасности и способности лучше управлять транспортным потоком;
- Более высокий скоростной лимит для автономных транспортных средств;
- Сокращение физического пространства, необходимого для парковки транспортных средств;
- Снижение числа угонов автомобилей, благодаря повышению осведомленности о транспортном средстве;
- Снятие рулевого колеса;
- Экономия топлива;
- Освобождение пассажиров от вождения и навигации, что позволяет выполнять другие задачи или отдыхать во время длительных и интенсивных поездок;
- Минимизация скоростной разницы между транспортными средствами;
- Сокращение физических дорожных знаков и более плавной езды;
- Отсутствие сдачи экзамена по вождению или получения водительских прав;
- Повышенная мобильность для детей, пожилых людей, инвалидов и малоимущих;
- Коммерческий обмен автомобилями (каршеринг).

Несмотря на большое количество преимуществ, также сохраняются недостатки:

- Потеря большинства сфер деятельности, связанных с вождением транспортных средств (водители такси, грузоперевозок, автобусов и др.);
- Потеря конфиденциальности;
- Высокий риск использования беспилотных автомобилей в качестве террористических актов;
- Восприимчивость автомобильной навигационной системы к различным типам погоды;
- Временные зоны строительства, которые не обозначены на картах или базах данных;
- Определение уровня серьезности препятствий на полосе движения;
- Невербальные сигналы/жесты;
- В случае выхода из строя основного датчика, автомобиль подвергает опасности остальных участников дорожного движения;
- Сбой или ошибка в системе может привести к несчастному случаю со смертельным исходом и гибели людей. Необходима надежность программного обеспечения;
- Существует риск кибератак;
- Недостаточное обнаружение светофора;
- Высокая стоимость разработки (себестоимость).

1.2 Технология «Цифровой двойник»

«Цифровой двойник» - программный аналог физического устройства, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействия помех и окружающей среды.

Технология «ЦД» позволяет проводить виртуальное тестирование и оптимизировать инженерные характеристики ТС, моделировать и измерять любые его показатели в различных условиях жизненного цикла с детальным учетом характеристик материалов и особенностей технологических процессов.

Связь между физическим и цифровым двойником позволяет отслеживать характеристики ТС и историю обслуживания, а также выявлять и сообщать об аномальном поведении и рекомендовать/планировать техническое обслуживание (Далее – ТО). «ЦД» позволяет решать задачи поддержки объекта на протяжении всего жизненного цикла.

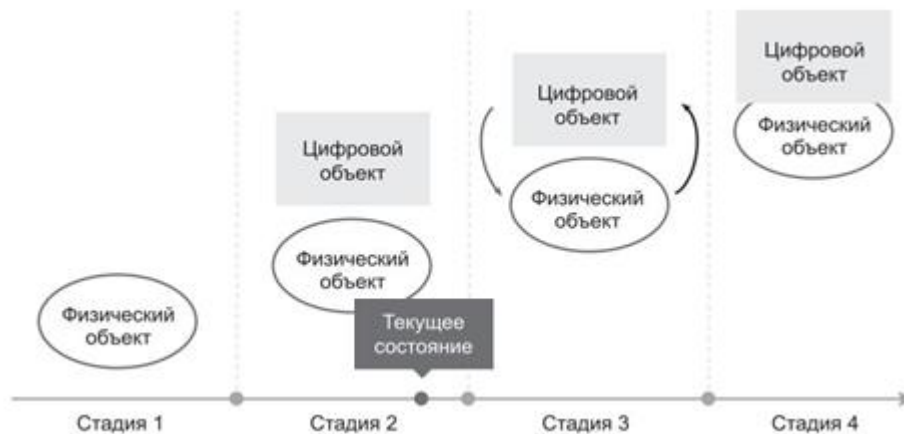


Рисунок 4. Стадии развития технологии «Цифровой двойник»

Благодаря взаимодействию систем, которые оснащены в ТС и позволяют автономно передвигаться на дорогах общего пользования, данная технология станет важнейшим прорывом в рамках машинного обучения и в целом в автомобилестроении. Реализация данной технологии позволит отслеживать автомобиль удаленно и, при необходимости, передаст все данные о поломках объекта в ближайший пункт ТО.

Ключевую роль при реализации данной технологии играет разработка математических, физических, кинематических моделей, а именно уровень их поведения по отношению к реальным объектам и процессам, окружающему миру.

1.2.1 Типы «Цифрового двойника»



Рисунок 5. Типы «Цифрового двойника»

Впервые профессор Мичиганского университета Майкл Гривз определил 3 типа цифрового двойника (Рисунок 5).

1. Цифровой двойник «Прототип»:

Данный тип ЦД является полным прототипом физического объекта. В нем содержится входной информационный набор, необходимый для описаний и реализации физической версии. Эти информационные наборы включают в себя требования, спецификацию документов, процессов, услуг и прочих процессов.

2. Цифровой двойник «Экземпляр»:

Тип цифрового двойника, описывающий конкретный физический продукт, с которым ЦД непосредственно связан на протяжении всего срока службы продукта. В ЦД содержится, в зависимости от сценариев использования, следующие наборы данных:

- 3D - модель, которая описывает геометрию физического объекта и его компоненты;
- Список процессов, действий, операций, которые были выполнены при создании физического объекта, вместе с результатами измерений и испытаний;

- Рабочие состояния, полученные с датчиков.

3. Цифровой двойник «Агрегатор»

Тип представляет собой объединение множества двойников. Он имеет доступ ко всем виртуальным прототипам и может запрашивать информацию о группе объектов. Также агрегатор постоянно записывает показания датчиков и сопоставляет их с показаниями, которые были зафиксированы во время сбоя.

1.2.2 Цели и задачи технологии «Цифровой двойник»



Рисунок 6. Цели и задачи «Цифрового двойника»

Основными целями и задачами внедрения технологии «ЦД» являются (Рисунок 6):

1. Сокращение времени, затрат на разработку и проектирование за счет проектирования большего количества вариантов конструкции объектов в ограниченное время;
2. Снижение количества стендовых и натурных испытаний.

Предполагается замена реальных испытаний на виртуальные, в том числе переход на цифровую сертификацию;

3. Повышение надежности объекта и ресурсооборота за счет увеличения наработок при своевременном проведении профилактического обслуживания в отличие от технического;
4. Получение заданных и перспективных характеристик объекта за счет максимально точного описания и проектирования процессов;

5. Повышение экономической эффективности для эксплуатанта через индивидуальные рекомендации по режимам эксплуатации с учетом его особенностей;
6. Ускорение реакции на проблемы, оптимизация уровня обслуживания в эксплуатации через обеспечение и своевременную доставку необходимых запасных частей и обслуживание персонала с необходимыми навыками в нужное место и время для сокращения простоя объекта в ремонте.

1.2.3 Уровни виртуального представления технологии

В книге «Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт» авторы выделяют 4 уровня виртуального представления (Таблица 2) [18]

Таблица 2. Уровни виртуального представления технологии

Уровень	Уровень сложности модели	Физический объект	Получение данных от физического двойника	Машинное обучение (предпочтения оператора)	Машинное обучение (система/окружающая среда)
Пре-ЦД (Pre-Digital Twin)	Виртуальная модель с акцентом на технологию/снижение технических рисков	Не существует	Не применимо	Нет	Нет
ЦД (Digital Twin)	Виртуальная модель физического объекта	Существует	Производительность, статус технического состояния, техническое обслуживание; пакетные обновления	Нет	Нет
Адаптивный ЦД	С адаптивным пользовательским интерфейсом	Существует	Производительность, статус технического состояния, техническое обслуживание; обновления в режиме реального времени	Да	Нет
Интеллектуальный ЦД (Intelligent Digital Twin)	С адаптивным пользовательским интерфейсом и с обучением с подкреплением	Существует	Производительность, статус технического состояния, техническое обслуживание, информация об окружающей среде, обновления в режиме пакетных обновлений и в режиме реального времени	Да	Да

- Уровень 1. «Предшественник ЦД» (Pre-Digital Twin). Это цифровая модель высокой точности, которая создается до этапа изготовления производства физического изделия – до появления цифровой тени. Другое название ЦД такого типа – «ЦД стадии проектирования», которое уже прижилось в русскоязычных публикациях на тему ЦД.

- Уровень 2. ЦД (Digital Twin). Классический ЦД, который появляется на стадии, когда есть пара (цифровой и физический двойники), и, соответственно, цифровая модель уточняется на базе данных цифровой тени.

- Уровень 3. Адаптивный цифровой двойник (Adaptive Digital Twin) позволяет изучать предпочтения/приоритеты людей-операторов в разных контекстах, с использованием алгоритма машинного обучения на основе нейронной сети. Модели, используемые в этом ЦД, постоянно обновляются на основе данных, извлекаемых из физического двойника в режиме реального времени. ЦД может поддерживать планирование в реальном времени и принимать решения во время операций, технического обслуживания и поддержки.

- Уровень 4. Интеллектуальный ЦД (Intelligent Digital Twin) обладает всеми возможностями ЦД 3-го уровня (включая машинное обучение с учителем), а также обладает способностью машинного обучения без учителя – может распознавать объекты и шаблоны, встречающиеся в операционной среде. ЦД на этом уровне обладает высокой степенью автономии, может анализировать более детальные данные о производительности, обслуживании и работоспособности, полученные от реальных объектов.

Концепция цифрового двойника подразумевает за собой виртуальную модель материального объекта, которая взаимодействует друг с другом на протяжении всего жизненного цикла:

1. Концепция;

2. Тестирование;
3. Разработка / Доработка;
4. Виртуальные испытания;
5. Производство;
6. Стендовые и натурные испытания;
7. Эксплуатация;
8. Утилизация.

Данный тип «Цифрового двойника» используется при внедрении технологии в производство.

1.2.4 Применение технологии «Цифровой двойник» АТС в эксплуатации

Рассмотрим разработку программного продукта с внедрением технологии «Цифровой двойник» на основе аналитической модели и модели, основанной на численном решении дифференциальных уравнений.

Метод основан на сборе данных из основных частей, агрегатов, а также электронной системы транспортного средства (физического двойника), путем компьютерной диагностики, считывания информации в памяти контроллера кодов неисправностей, сенсоров и различных датчиков (лидаров, радаров и др.) в реальном времени.

На базе полученных данных формируется цифровая модель двойника, которая учитывает изменения состояния автомобиля.

Программный продукт, разработанный на основе технологии «ЦД», позволяет заниматься мониторингом частей транспортного средства, агрегатов, сенсоров, анализировать большое количество информации, при необходимости, предсказать возможный отказ того или иного узла физического объекта. Следующим событием после анализа является поиск и сообщение о рекомендациях, которые позволят полностью контролировать профилактическое и техническое состояния всего автомобиля (сообщения о необходимости провести ТО, замене масла, проверки двигателя и др.).

Цифровой двойник хранит в себе следующую информацию физического объекта (автомобиля):

- Концептуальную и геометрическую 3D-модель реального объекта;
- Концептуальную и геометрическую 3D-модель компонентов автомобиля;
- Математическую модель поведения автомобиля;
- Материальную и физическую модель всех частей и агрегатов автомобиля (характеристики материала), которая позволит предупредить о нарушении целостности компонентов автомобиля;
- Информацию о влиянии внешних воздействий;
- Данные датчиков и электронной системы автомобиля.

1.2.4.1 Пример структурной схемы математической модели автомобиля

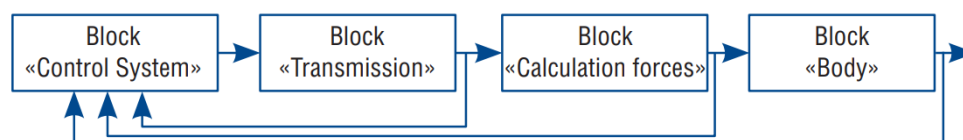


Рисунок 7. Структурная схема математической модели автомобиля

На (Рисунок 7) представлена структурная схема математической модели расчета сил и моментов, действующих на колеса автомобиля и сам автомобиль:

- Блок «Body» моделирует движение автомобиля в плоскости как плоскопараллельное движение твердого тела.
- Блок «Calculation forces» производит расчет сил в каждый момент времени.
- Блок «Transmission» является математической моделью трансмиссии с индивидуальным электроприводом каждого колеса.
- Блок «Control System» является системой управления, которая осуществляет задание на формирование тяговых моментов на каждом колесе.

Данная структура является важнейшей частью при интеграции технологии «Цифровой двойник», так как она полностью повторяет алгоритм поведения реального объекта (АТС).

1.2.5 Разработка геометрической 3D-модели физического двойника (автомобиля)

Геометрические модели (Geometry Models) описывают физический объект с точки зрения его формы, размера, допусков и т. д.

Разработка геометрической 3D-модели (Рисунок 8) необходима для виртуального представления продукта.



Рисунок 8. Геометрическая 3D-модель физического двойника в CAE-системе

На последнем этапе разработки программного продукта, данная визуализация продукта позволит совершать виртуальные испытания, дорожные заезды (Рисунок 9), решать важные задачи моделирования, оптимизации и поддержания продукта на всем жизненном цикле.

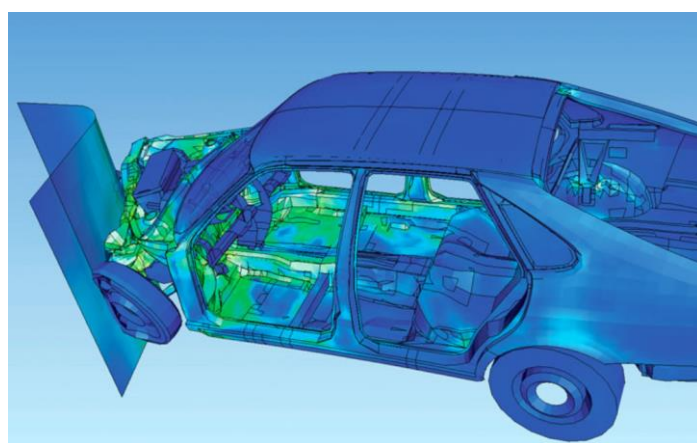


Рисунок 9. Виртуальные испытания цифрового двойника

Также при разработке цифрового двойника следует учитывать состав материала, знания о технологических процессах обработки материалов, использование электрических схем.

Данный фактор необходим для того, чтобы цифровой двойник стал полным прототипом физического двойника в разрезе физических свойств. Помимо этого, такие знания помогут при модернизации компонентов физического двойника в случае, если старые пришли в непригодность, а также их оптимизации и сопровождения.

1.2.6 Концепция программного обеспечения с использованием технологии «Цифровой двойник»

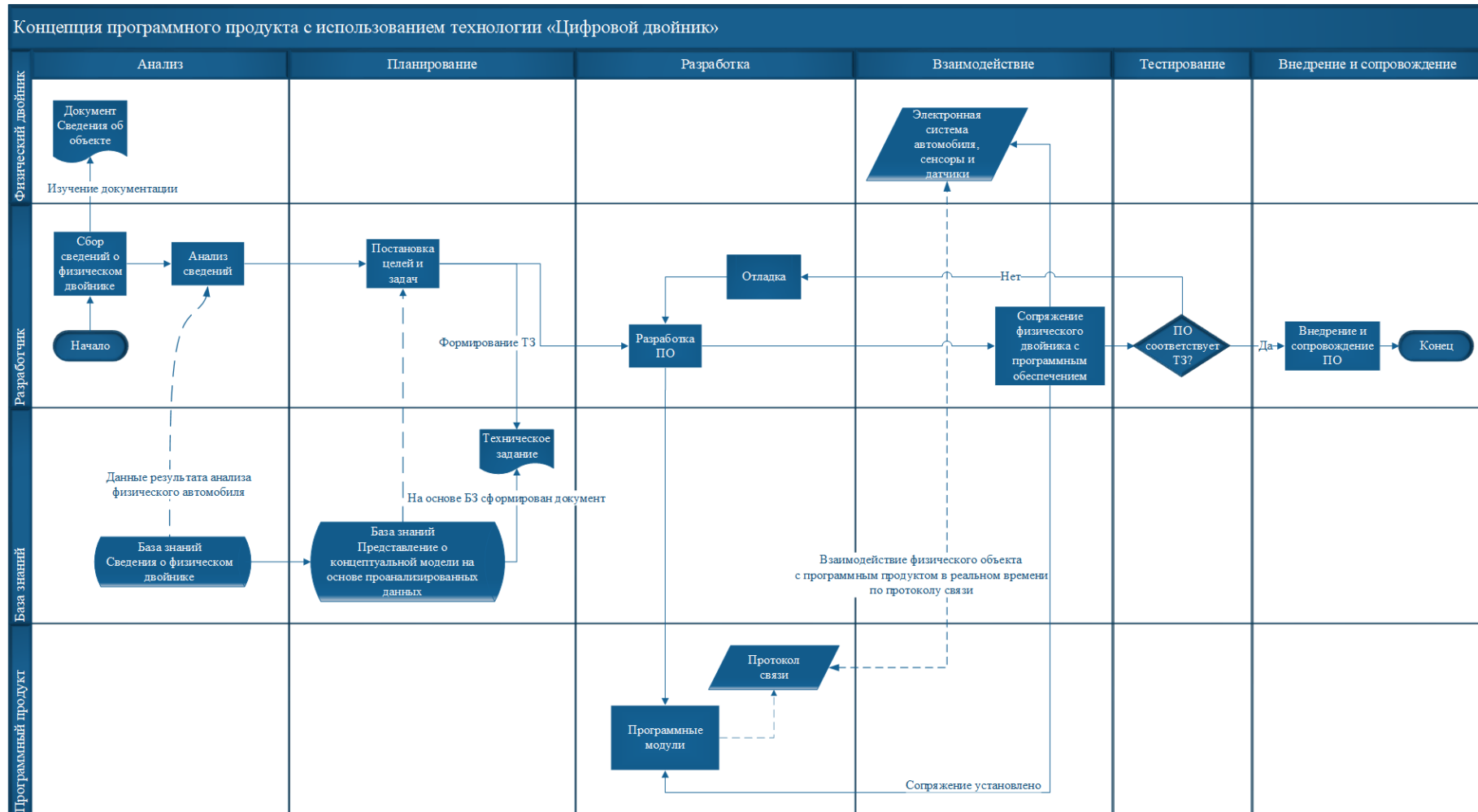


Рисунок 10. Функциональная блок-схема концепции программного продукт с использованием технологии «Цифровой двойник»

На (Рисунок 10) отражена функциональная блок-схема концептуальной разработки программного продукта с использованием технологии «Цифровой двойник».

Данная концепция состоит из следующих блоков:

1. Анализ;
2. Планирование;
3. Разработка;
4. Взаимодействие (сопряжение физического объекта с программным продуктом);
5. Тестирование;
6. Внедрение.

1.2.6.1 Блок «Анализ»

Данный блок отражает изучение всей необходимой документации, теоретических сведений о физическом объекте (от компонентов автомобиля до электронной системы).

1.2.6.2 Блок «Планирование»

На данном этапе разработчик, проанализировав всю необходимую информацию, ставит цели и задачи, разрабатывает ТЗ на программную продукцию, рассчитывает временные затраты, занимается поиском узких мест.

1.2.6.3 Блок «Разработка»

Разработчик, имея детальное ТЗ, всю необходимую информацию, приступает к написанию программного кода для реализации запланированного поведения продукта.

1.2.6.4 Блок «Взаимодействие»

На данном этапе разработчик, предварительно завершив написание кода, приступает к подключению физического двойника (реального автомобиля) к программному продукту.

1.2.6.5 Блок «Тестирование»

На этапе оценки программного продукта разработчик тестирует ТЗ, сопоставляет функционал приложения с пунктами документации и при необходимости корректирует программный код для решения тех или иных проблем/нюансов.

После успешного тестирования программного продукта разработчик занимается внедрением и сопровождением данного приложения.

1.2.6.6 Блок «Внедрение и сопровождение»

На данном этапе разработчик настраивает программный продукт под определенные условия пользования, а также обучает пользователей работе с программным продуктом (написание инструкции пользователя и других необходимых нормативно-справочных документов).

1.3 Прогнозируемое обслуживание транспортного средства «Predictive maintenance»

Поддержание технического состояния необходимо на протяжении всего жизненного цикла транспортного средства. Своевременное решение проблемы способствует, в первую очередь, продлению срока службы ТС, а также приводит к экономии денежных средств и времени.

Применение прогнозируемого ТО позволяет в режиме реального времени получать и обрабатывать данные из АТС. То есть прогнозируемое ТО, в отличие от планового, способствует заблаговременно сигнализировать о необходимости в обслуживании или замене компонентов ТС.

На (Рисунок 11) показана структура работы прогнозируемого ТО.

Технология в режиме реального времени отслеживает данные датчиков АТС. Подключенные датчики IoT могут предоставлять актуальные данные о деталях автомобиля и отправлять диагностические коды неисправностей для отслеживания механических неисправностей.

Подключенное устройство в АТС, которое отслеживает данные с датчиков, передает их на удаленный сервер и хранит. Алгоритмы технологии обрабатывают входные данные, анализируют коды ошибок, прогнозируют дальнейшее лечение и передают инженеру / водителю уведомление о необходимости произвести технический обслуживание в станции ТО.

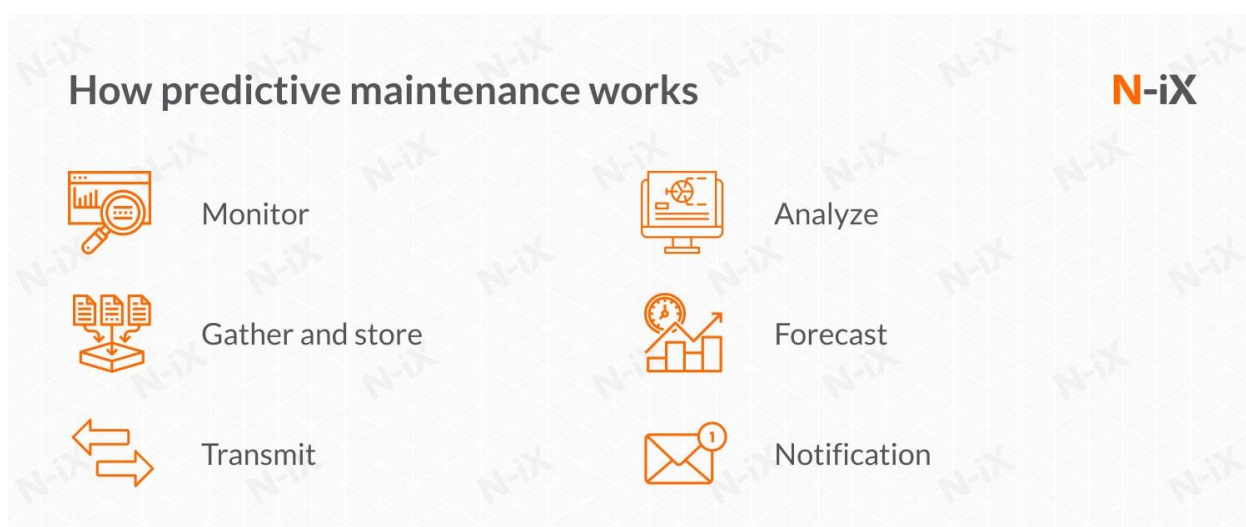


Рисунок 11. Схема работы технологии прогнозируемого обслуживания транспортных средств

В своей научной работе Кэсседи Шелл описывает прогнозируемое обслуживание как уникальную технологию, которая позволит сократить время простоя транспортных средств и оптимизировать состояние ТС, чтобы продлить срок службы объекта.

В чем же особенность прогнозируемого обслуживания транспортного средства над другими видами обслуживания?

Рассмотрим более подробно основные виды технического обслуживания [15]:

1. Реактивное ТО:

При реактивном подходе поддержка транспортного средства возникает лишь в том случае, когда необходимо устранить непредвиденную проблему или ЧС.

То есть, прежде чем проводить реактивное ТО, инициаторы ожидают сбоя или полного отказа системы. В случае отказа основных частей ТС вызывают специалиста для его обслуживания.

Данный подход является наиболее рискованным и самым дорогим из 3-х подходов, однако он применяется чаще всего.

2. Плановое ТО:

Плановое техническое обслуживание является распространенным способом предупреждения поломки агрегатов транспортных средств и ЧС. Данный метод ТО выполняется на регулярной основе (вне зависимости от состояния объекта). Плановое ТО выполняется на регулярной основе в соответствии с графиком, даже если оно не требуется.

Плановое обслуживание обходится дешевле реактивного, но дороже прогнозируемого.

3. Прогнозируемое ТО:

Прогнозируемое техническое обслуживание является одним из способов запланированного ТО. Но в данном случае график основан не на временных интервалах, а на результатах диагностики системы и частей ТС.

Как и плановое ТО, прогнозируемое основано на принципе превосходства предупреждающего подхода над реактивным. Однако вместо выполнения ремонта на основании заранее определенного временного интервала при прогнозируемом ТО ремонт выполняется на основании фактического состояния объекта.

Достижения в области технологий Интернета вещей (IoT) и распространение открытых протоколов для подключения к открытому доступу в Интернет делают доступным увеличение количества контрольных датчиков. Это открыло возможности для инноваций в планировании и выполнении ТО.

Подход прогнозируемого технического обслуживания обладает и другими преимуществами:

- стоимость технического обслуживания уменьшается на 50%.
- непредвиденные отказы уменьшаются на 55%;
- средняя наработка на отказ увеличивается на 30%;
- работоспособность узлов и механизмов увеличивается на 30%.

Таким образом прогнозируемое ТО обладает рядом преимуществ по отношению к другим типам технического обслуживания и является более оптимальным как в стоимостной оценке, так и в целом обслуживании ТС.

Однако если говорить о полной автоматизации транспортного средства, а именно, о беспилотном движении, то такой тип обслуживания имеет небольшие проблемы:

1. В случае полной автоматизации ТС и движение по дорогам общего пользования будет без водителя, то это вызовет проблему в том случае, если автомобиль столкнется с поломкой. Потребуется первичное вмешательство человека для замены вышедших из строя деталей. Водитель – испытатель всегда будет востребован в данной сфере, даже если автомобили достигнут последнего уровня автоматизации.
2. Еще одна немало важная проблема – вывод датчиков из строя. Датчики могут быть подвержены внешнему воздействию, вследствие

чего могут собирать неточные данные. Из, казалось бы, незначительной проблемы, все может перерасти в большое чрезвычайное происшествие на дороге, так как автономное ТС с неисправными датчиками является опасным участником дорожного движения.

Глава 2 РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА «CHEVROLET ORLANDO» В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ «SIEMENS PRESCAN»

В данной главе пошагово рассмотрим разработку будущей 3D-модели цифрового двойника «Chevrolet Orlando», различных компонентов в программной среде «Autodesk 3ds Max 2021» на базе транспортного средства «Chevrolet Orlando» 1.8 6AT 2012 (Рисунок 12).



Рисунок 12. Физический объект «Chevrolet Orlando 1.8 6AT 2012»

Разработка цифрового двойника состоит из нескольких пунктов:

1. Доработаем 3D-модель в части создания точек координат для последующего импорта и визуализации поворачиваемости в программной среде «Siemens Prescan».
2. Импортируем модель и настроим динамические и технические характеристики цифрового двойника.
3. Проанализируем и опишем используемую динамическую модель автомобиля.
4. Зафиксируем структуры входных параметров и характеристик.
5. Определим параметры и характеристики транспортного средства, которые изменяются в эксплуатации.

2.1 Разработка 3D-модели цифрового двойника «Chevrolet Orlando» в программной среде «Autodesk 3ds Max 2021»

Для разработки цифрового двойника автомобиля «Chevrolet Orlando» за основу была взята 3D-модель «Chevrolet Orlando 2011», автором которой является «Hum3D» [11].



Рисунок 13. Исходная 3D-модель физического объекта

Для корректного использования данной модели в программной среде «Siemens Prescan» были произведены следующие изменения:

1. Настроена ориентация модели для импорта (выделены на рис под красными квадратами) в сторонние программные продукты;



Рисунок 14. Доработанная 3D-модель

2. Для воссоздания точной копии цифрового двойника были добавлены государственные регистрационные знаки повторяющие регистрационные знаки физического объекта;



Рисунок 15. Модель регистрационного номерного знака

3. В программной среде «Autodesk 3ds Max» была создана иерархия для компонентов колес, которая позволит выполнить их сопоставление и визуализацию поворачиваемости АТС в «Siemens Prescan». В каждой группе созданы точки оси координат, которые привязаны к колесам.

Иерархия колес АТС состоит из 4 групп:

1. WheelLF_Nodes – Левое переднее колесо (Рисунок 16, сноска 1).

WheelLF_Joint – точка оси координат.

Компоненты колес:

- WheelLF;
- WheelLF.001;
- WheelLF.002;
- WheelLF.003;
- WheelLF.004;
- WheelLF.005;
- WheelLF.006.

2. WheelLR_Nodes – Левое заднее колесо (Рисунок 16, сноска 2).

WheelLR_Joint – точка оси координат.

Компоненты колес:

- WheelLR;
- WheelLR.001;
- WheelLR.002;
- WheelLR.003;
- WheelLR.004;
- WheelLR.005;
- WheelLR.006;
- WheelLR.007.

3. WheelRF_Nodes – Правое переднее колесо (Рисунок 16, сноска 3).

WheelRF_Joint – точка оси координат.

Компоненты колес:

- WheelRF;
- WheelRF.001;
- WheelRF.002;
- WheelRF.003;
- WheelRF.004;
- WheelRF.005;
- WheelRF.006;
- WheelRF.007.

4. WheelRR_Nodes – Правое заднее колесо (Рисунок 16, сноска 4).

WheelRR_Joint – точка оси координат.

Компоненты колес:

- WheelRR;
- WheelRR.001;
- WheelRR.002;
- WheelRR.003;
- WheelRR.004;
- WheelRR.005;
- WheelRR.006;
- WheelRR.007.

Пример сформированной точки координат представлен на Рисунок 17.

SteeringWheel_Nodes	Group			
SteeringWheel_Joint	Helper			1
SteeringWheel	interior	Geometry		
WheelLF_Nodes	Group			
WheelLF_Joint	Helper			
WheelLF	bolt_mso	Geometry		
WheelLF.001	black	Geometry		
WheelLF.002	brakedisk	Geometry		2
WheelLF.003	tire	Geometry		
WheelLF.004	rim	Geometry		
WheelLF.005	chrome #Car	Geometry		
WheelLF.006	gold #car	Geometry		
WheelLR_Nodes	Group			
WheelLR_Joint	Helper			
WheelLR	matmetal	Geometry		
WheelLR.001	black	Geometry		
WheelLR.002	brakedisk	Geometry		3
WheelLR.003	tire	Geometry		
WheelLR.004	rim	Geometry		
WheelLR.005	chrome #Car	Geometry		
WheelLR.006	chrome #Car	Geometry		
WheelLR.007	gold #car	Geometry		
WheelRF_Nodes	Group			
WheelRF_Joint	Helper			
WheelRF	matmetal	Geometry		
WheelRF.001	black	Geometry		
WheelRF.002	brakedisk	Geometry		4
WheelRF.003	tire	Geometry		
WheelRF.004	rim	Geometry		
WheelRF.005	chrome #Car	Geometry		
WheelRF.006	chrome #Car	Geometry		
WheelRF.007	gold #car	Geometry		
WheelRR_Nodes	Group			
WheelRR_Joint	Helper			
WheelRR	matmetal	Geometry		
WheelRR.001	black	Geometry		
WheelRR.002	brakedisk	Geometry		5
WheelRR.003	tire	Geometry		
WheelRR.004	rim	Geometry		
WheelRR.005	chrome #Car	Geometry		
WheelRR.006	chrome #Car	Geometry		
WheelRR.007	gold #car	Geometry		

Рисунок 16. Иерархия колес цифрового двойника

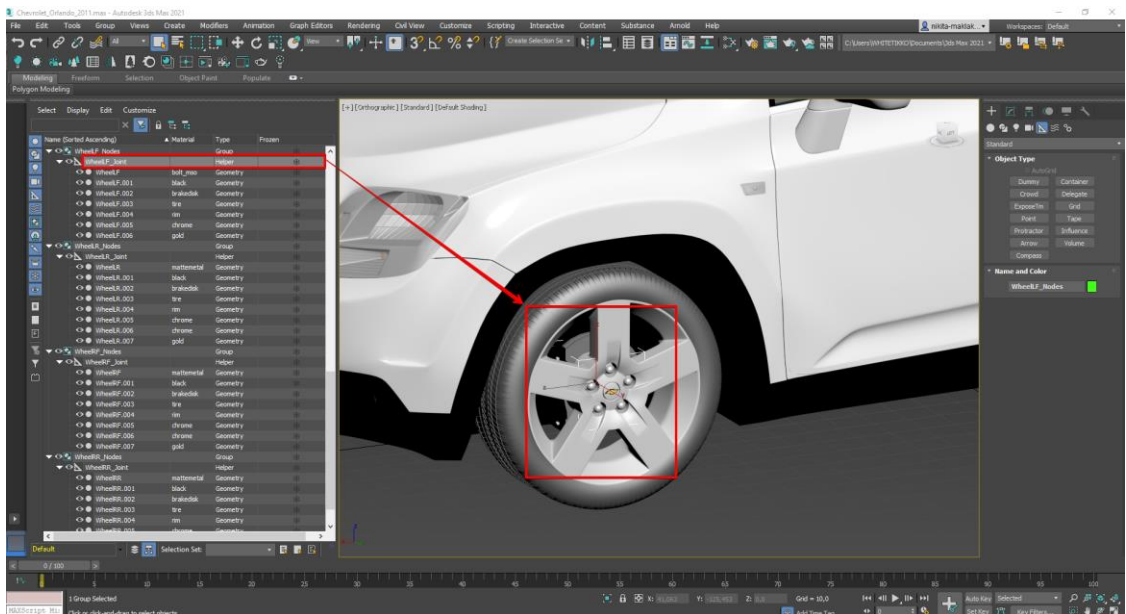


Рисунок 17. Точка координат для сопоставления колес

2.2 Исходные данные модели цифрового двойника в «Siemens Prescan»

Загрузка модели в программную среду «Siemens Prescan» происходит через пользовательский интерфейс «Model Preparation Tool» (Далее - МРТ).

После импорта 3D-модели в пользовательском интерфейсе МРТ необходимо указать входные данные (информацию о модели, внешние и внутренние характеристики и другие параметры загружаемой модели «Chevrolet Orlando»).

2.2.1 Блок «Canvas Data»

Блок «Canvas Data» необходим для определения модели в пользовательском интерфейсе «Siemens Prescan». Он также содержит информацию о загружаемой 3D-модели.

Данные блока разделены на три раздела:

1. «Editor data» - информационные данные загружаемой модели;
2. «Images» - иконки загружаемой модели;
3. «3D-model» - информация о модели (внутренняя), размеры и координаты модели.

В Таблица 3 указаны значения для загружаемой 3D-модели «Chevrolet Orlando»

Таблица 3. Блок «Canvas Data»

Наименование свойства	Описание	Значение
Раздел «Editor Data»		
Type name	Уникальное имя, которое Prescan использует для идентификации модели.	Orlando
Category	Категория загружаемой модели (Автомобиль, мотоцикл, человек, здание и т. д.)	Car
Main tab	Главная вкладка панели инструментов редактора Prescan, в которой будет находиться модель.	Actors
Sub tab	Вложенная вкладка панели инструментов редактора Prescan, в которой будет находиться модель.	Cats & Motors

Наименование свойства	Описание	Значение
Model name	Наименование, которое будет использоваться для модели в меню редактора Prescan.	Orlando
Description	Описание модели, которое отображается в редакторе Prescan.	Orlando
Раздел «Images»		
Icon	Путь к значку модели	1111_IconPicture.png
CS picture	Путь к изображению, которое будет использоваться для представления общей модели на листе компиляции	1111.png
Top view	Путь к изображению, содержащему модель вида сверху.	1111_TopView.png
Side view	Путь к изображению, содержащему модель вида сбоку	1111_SideView.png
Раздел «3D Model»		
Model file	Путь к 3D-модели в формате «.osgb»	1111.osgb
Size [m]	Размер модели в метрах. X – глубина; Y – ширина; Z – высота. Эти значения автоматически вычисляются после импорта модели	X: 4,65 Y: 2,12 Z: 1,88
Origin [-]	Точка в модели, определяющая начало координат на изображении вида сверху. Все значения должны находиться в диапазоне от 0 до 1. Эти значения автоматически вычисляются после импорта модели.	X: 0,50 Y: 0,50 Z: 0,00
CoG [m]	Центр тяжести модели определяется из начала координат модели в метрах. Пользователю необходимо вручную определить параметр после импорта модели	X: 1,51 Y: 0,00 Z: 0,40

2.2.2 Блок «Vehicle Dynamics»

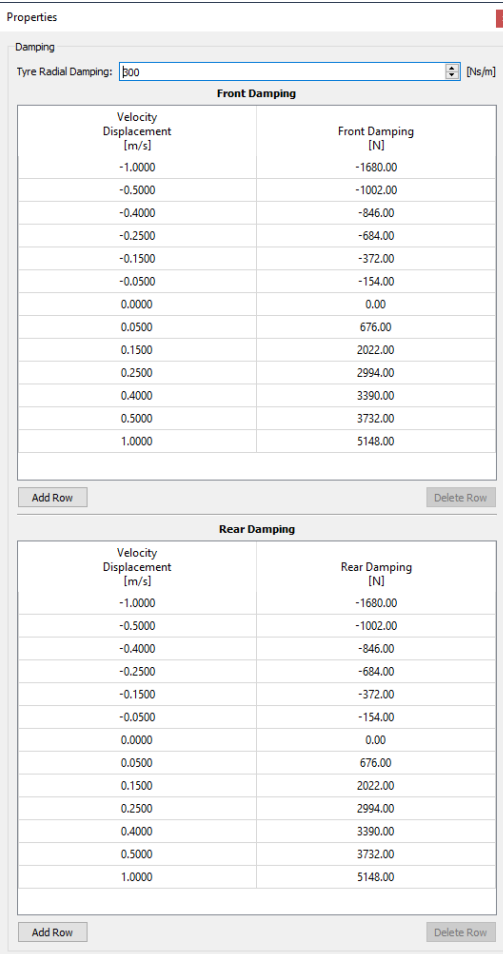
В блоке «Vehicle Dynamics» пользователь указывает режим динамики автомобиля. В случае с цифровым двойником «Chevrolet Orlando» был указан режим динамики – «2D & 3D Dynamics».

2.2.2.1 Damping – параметризация демпфирования колес автомобиля

В разделе «Damping» указываются параметры демпфирования для передних и задних колес.

На Рисунок 18 указаны значения параметров демпфирования для передних и задних колес модели «Chevrolet Orlando».

Зависимость демпфирования передних и задних колес строится по отношению к скорости перемещения «Velocity Displacement» измеряемая в м/с.



Properties

Damping

Tyre Radial Damping: [300] [N/m]

Front Damping	
Velocity Displacement [m/s]	Front Damping [N]
-1.0000	-1680.00
-0.5000	-1002.00
-0.4000	-846.00
-0.2500	-684.00
-0.1500	-372.00
-0.0500	-154.00
0.0000	0.00
0.0500	676.00
0.1500	2022.00
0.2500	2994.00
0.4000	3390.00
0.5000	3732.00
1.0000	5148.00

Add Row Delete Row

Rear Damping	
Velocity Displacement [m/s]	Rear Damping [N]
-1.0000	-1680.00
-0.5000	-1002.00
-0.4000	-846.00
-0.2500	-684.00
-0.1500	-372.00
-0.0500	-154.00
0.0000	0.00
0.0500	676.00
0.1500	2022.00
0.2500	2994.00
0.4000	3390.00
0.5000	3732.00
1.0000	5148.00

Add Row Delete Row

Рисунок 18. Раздел «Damping». Значения для загружаемой модели

2.2.2.2 Stiffness – параметризация жесткости колес автомобиля

В разделе «Stiffness» указываются значения параметров жесткости колес загружаемой модели «Chevrolet Orlando». На Рисунок 19 указаны их значения.

Зависимость жесткости передних и задних колес строится по отношению к перемещению «Displacement» измеряемая в метрах.

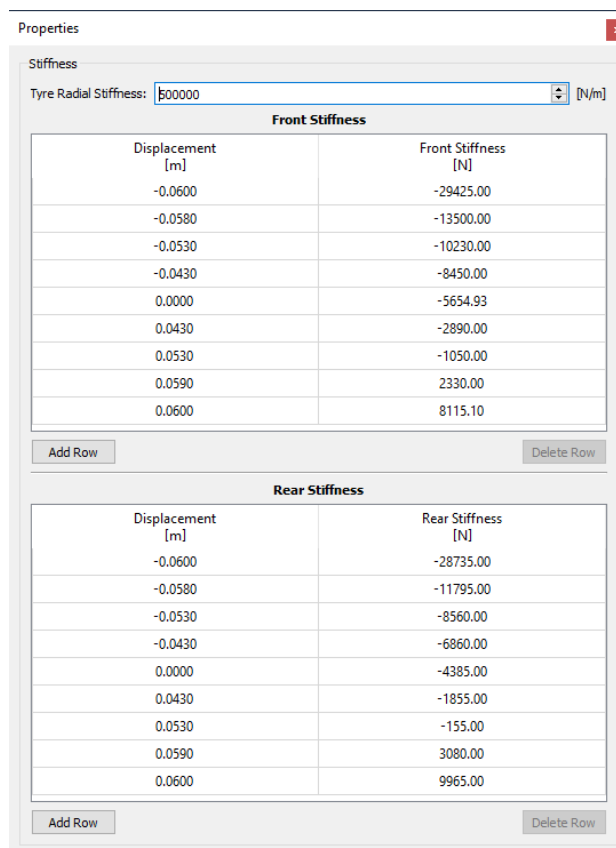


Рисунок 19. Раздел «Stiffness». Значения для загружаемой модели

2.2.2.3 Dynamics

В данном разделе заносятся значения динамических параметров автомобиля:

Исходные значения динамических параметров представлены в Таблица 4.

Таблица 4. Раздел «Dynamics». Исходные значения загружаемой модели

Наименование свойства	Описание	Значение
Раздел «Dynamics Parameters»		

Наименование свойства	Описание	Значение
Moment of Inertia J_{xx} [kg m ²]	Момент инерции кузова транспортного средства вокруг оси x	954
Moment of Inertia J_{yy} [kg m ²]	Момент инерции кузова транспортного средства вокруг оси y	3858
Moment of Inertia J_{zz} [kg m ²]	Момент инерции кузова транспортного средства вокруг оси z	3967
CoG location a [m]	Расстояние от центра тяжести до передней оси	1,250
CoG location b [m]	Расстояние от центра тяжести до задней оси	1,510
CoG location h [m]	Высота центра тяжести	0,396
Cornering Stiffness Front [N rad ²]	Жесткость передних шин при поворотах	72653
Cornering Stiffness Rear [N rad ²]	Жесткость задних шин при поворотах	121449
Suspension Stiffness Front [N m ²]	Система демпфирования скорости передней подвески	52151
Suspension Stiffness Rear [N m ²]	Система демпфирования скорости задней подвески	41400
Camber Stiffness Front [N rad ²]	Жесткость развала передних колес	0

Наименование свойства	Описание	Значение
Camber Stiffness Rear [N rad ²]	Жесткость развала задних колес	0
Suspension Damping Front [Ns m ²]	Амортизация передней подвески	4980
Suspension Damping Rear [Ns m ²]	Амортизация задней подвески	3624
Max Brake Pressure [bar]	Максимальное Усилие Педали Тормоза	150
Air Resistance Factor [-]	Коэффициент Сопротивления Воздуха	0,33
Ground Clearance [m]	Дорожный Просвет	0,165
Vehicle Height [m]	Высота ТС	1,633
Track Width [m]	Ширина Колеи	1,586
Tire Radius [m]	Радиус Шины	0,330
Offset [m]	Смещение	0,900

2.2.2.4 DriveLine

На данной вкладке редактируется стратегия переключения передач. Для трансмиссии количество передач и соответствующие передаточные числа могут быть изменены. В Таблица 5 указаны исходные значения для разрабатываемого автономного транспортного средства.

Таблица 5. Раздел «DriveLine». Исходные значения загружаемой модели

Наименование свойства	Описание	Значение
Табличная часть «DriveLine properties»		
R Final drive	Передаточное число главной передачи	4,17

Наименование свойства	Описание	Значение
Up shift time	Задержка перед переключением повышающей передачи	1
Down shift time	Задержка перед переключением понижающей передачи	1
Табличная часть «Gear ratios»		
-1	Передаточное число задней передачи	3.55
0	Передаточное число нейтральной передачи	0.00
1	Передаточное число 1 передачи	3.82
2	Передаточное число 2 передачи	2.16
3	Передаточное число 3 передачи	1.48
4	Передаточное число 4 передачи	1.12
5	Передаточное число 5 передачи	0.87
6	Передаточное число 6 передачи	0.61

Стратегия переключения передач указывается для двух сторон движения – вперед, назад.

Значения распределения скорости для движения вперед представлены в Таблица 6.

Таблица 6. Распределение скорости относительно % раскрытия дроссельной заслонки в зависимости от передачи для движения вперед

% раскрытия дроссельной заслонки	1->2	2->3	3->4	4->5	5->6
0	30.34	52.72	74.67	94.10	110.83
25	32.78	57.23	81.67	104.26	125.67
35	35.22	61.74	88.67	114.42	140.50
50	37.66	66.25	95.67	124.58	155.33
90	40.10	70.76	102.67	134.74	170.17
100	42.54	75.27	109.67	144.90	185.00

Значения распределения скорости для движения назад представлены в Таблица 7.

Таблица 7. Распределение скорости относительно % раскрытия дроссельной заслонки в зависимости от передачи для движения назад

% раскрытия дроссельной заслонки	2->1	3->2	4->3	5->4	6->5
0	17.68	28.82	40.08	52.60	52.60
25	19.80	32.74	46.17	61.44	61.44
35	21.92	36.66	52.26	70.27	70.27
50	24.05	40.58	58.35	79.11	79.11
90	26.17	44.50	64.44	87.95	87.95
100	28.29	48.42	70.54	96.79	96.79

2.2.2.5 Engine

В данном разделе указываются значения распределения крутящего момента относительно числа оборотов коленчатого вала от % раскрытия дроссельной заслонки. Значения указаны в Таблица 8.

Таблица 8. Распределение крутящего момента относительно числа оборотов в минуту коленчатого вала в зависимости от % раскрытия дроссельной заслонки

% раскрытия дроссельной заслонки / об/мин	0%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
800	-8,51	76,62	85,14	94,60	105,11	116,79	129,76	144,18	160,20	178
1200	-8,85	79,64	88,48	98,32	109,24	121,38	134,87	149,85	166,50	185
1400	-8,99	80,93	89,92	99,91	111,01	123,35	137,05	152,28	169,20	188
1600	-9,14	82,22	91,35	101,51	112,78	125,32	139,24	154,71	171,90	191
2000	-9,33	83,94	93,27	103,63	115,15	127,94	142,16	157,95	175,50	195
2400	-9,47	85,23	94,70	105,23	116,92	129,91	144,34	160,38	178,20	198
2800	-9,57	86,09	95,66	106,29	118,10	131,22	145,80	162,00	180,00	200
3200	-9,57	86,09	95,66	106,29	118,10	131,22	145,80	162,00	180,00	200

2.2.2.6 Steering

В данном разделе указываются значения параметров, отвечающих за управление рулевым колесом. Значения представлены в Таблица 9.

Таблица 9. Определение параметров руля

Наименование свойства	Описание	Значение
Табличная часть «Steering Properties»		
Steering ratio	Соотношение угла поворота руля и угла поворота колеса	14,4
Maximum steering wheel angle	Максимальный угол поворота руля	493

2.2.2.7 Physics

Раздел «Physics» предназначен для определения соответствующих физических параметров, используемых для расчета поведения объекта во время моделирования. Исходные значения для загружаемой модели представлены в Таблица 10.

Таблица 10. Определение физических параметров транспортного средства

Наименование свойства	Описание	Значение
Табличная часть «Physics Properties»		
Roll friction coefficient	Момент инерции кузова транспортного средства вокруг оси x	0,01
Drag coefficient	Коэффициент трения используется для количественной оценки сопротивления воздуха. Коэффициент лобового сопротивления связан с площадью объекта	0,27
Mass [kg]	Масса объекта	1820
Reference area [m ²]	Контрольная площадь объекта	2,33
Max acceleration [g]	Максимальное ускорение	0,30
Max deceleration [g]	Максимальное замедление	1,00

2.2.3 Блок «Wheels»

В данном блоке происходит сопоставление реквизитов колес с элементами «Joints», настроенных в блоке «Joints» (раздел 2.2.4).

Исходное сопоставление для загружаемой модели представлено на Рисунок 20.

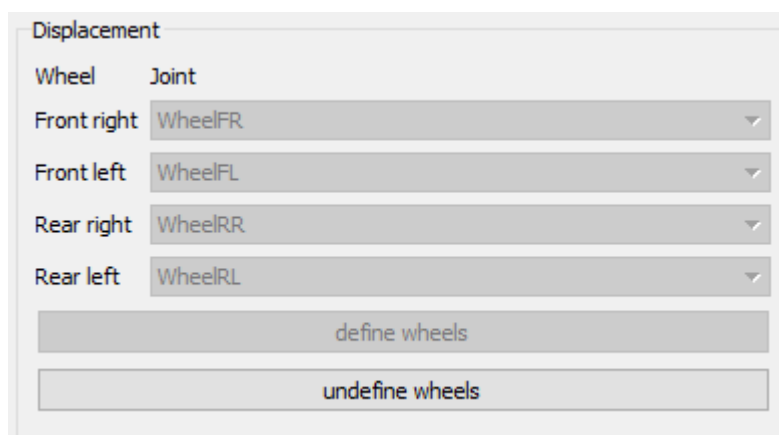


Рисунок 20. Сопоставление каждого колеса с элементами «Joints»

2.2.4 Блок «Joints»

В данном разделе происходит сопоставление точек координат колес транспортного средства с типовыми реквизитами в «Model Preparation Tool» (Таблица 11).

Таблица 11. Сопоставление точек координат колес с типовыми реквизитами

Наименование свойства	Описание	Значение
Раздел «Dynamics Parameters»		
Переднее левое колесо		
Display name	Наименование	WheelFL
Joint node	Точка координат переднего левого колеса	WheelFL_Joint
Переднее правое колесо		
Display name	Наименование	WheelFR
Joint node	Точка координат переднего правого колеса	WheelFR_Joint
Заднее левое колесо		
Display name	Наименование	WheelRL
Joint node	Точка координат заднего левого колеса	WheelRL_Joint
Заднее правое колесо		
Display name	Наименование	WheelRR
Joint node	Точка координат заднего правого колеса	WheelRR_Joint
Рулевое колесо		
Display name	Наименование	SteeringWheel

Наименование свойства	Описание	Значение
Joint node	Точка координат рулевого колеса	SteeringWheel_Joint

2.2.5 Блок «JointGroups»

В данном блоке группируются объекты, которые визуализируются при симуляции движения автомобиля. Например, два передних колеса транспортного средства группируются вместе, чтобы визуализировать управление / движение двумя колесами одновременно (Рисунок 21).

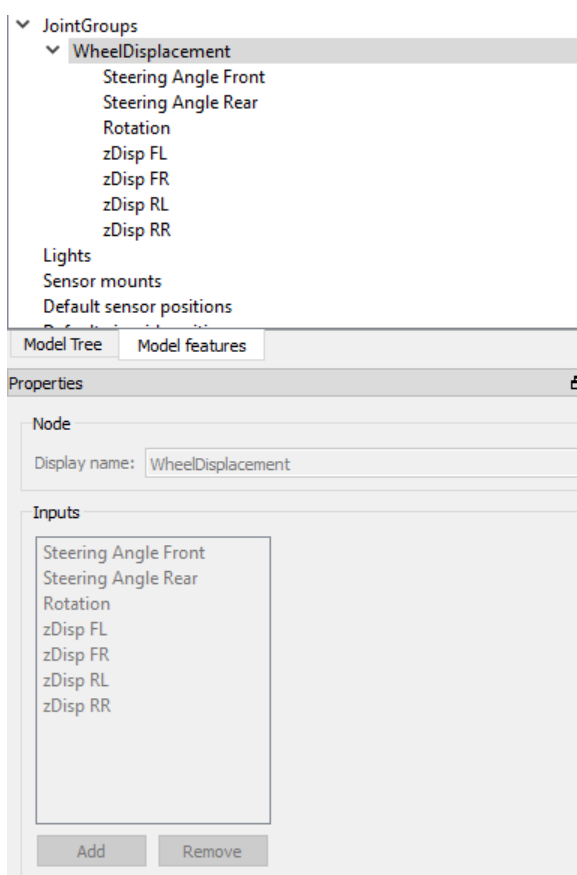


Рисунок 21. Формирование в единую группу точек координат колес и рулевого колеса для последующей визуализации при движении

После настройки исходных данных модель транспортного средства отобразится в списке моделей в программной среде «Simcenter Prescan» (Рисунок 22).

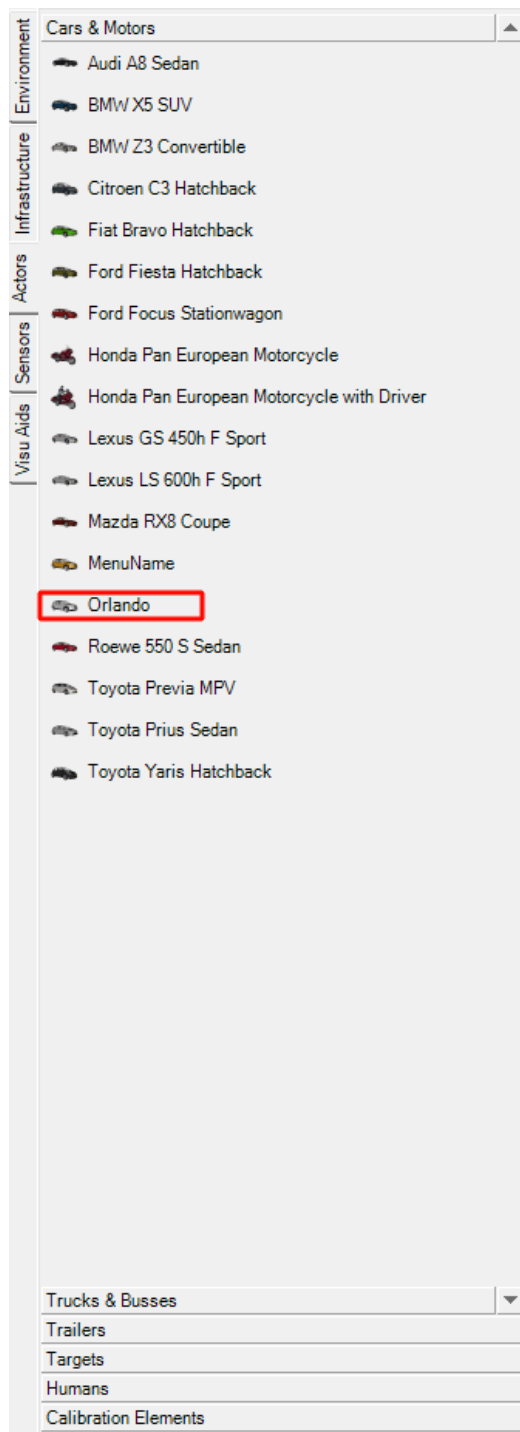


Рисунок 22. Отображение загружаемой модели в списке объектов «Simcenter Prescan»

2.3 Проектирование экспериментальных дорожных испытаний в программной среде «Simcenter Prescan»

2.3.1 Настройка параметров визуализации и сбора данных

Параметризация настроек «Simulation scheduler» является важной настройкой для симуляции разработанных испытаний. Планировщик моделирования рассчитывает время выполнения различных информационных потоков, происходящих между различными мирами Prescan. Иными словами, планировщик моделирования предоставляет обзор различных скоростей обновления данных.

Окно формы настройки моделирования показано на Рисунок 23.

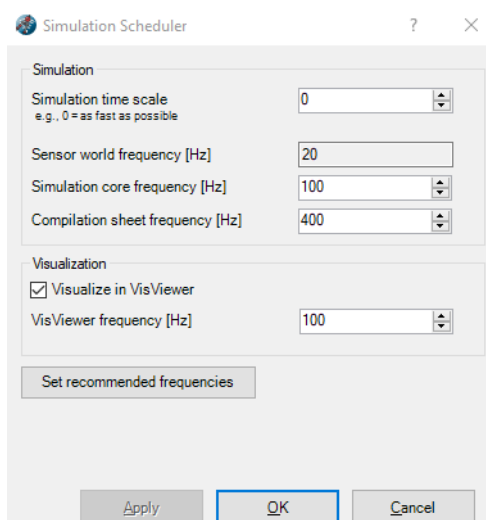


Рисунок 23. Окно формы «Simulation Scheduler». Исходные значения для виртуальных испытаний

«Simulation time scale» - шкала времени моделирования. Данный параметр является временным масштабом, в котором происходит моделирование. Имеет несколько значений:

1. [0] – быстрый запуск симуляции;
2. [1] – запуск моделирования в режиме реального времени (насколько это возможно);
3. [2] – запуск моделирования в режиме реального времени (половина скорости);
4. [3] – запуск моделирования при одной трети скорости реального времени.

«Sensor world frequency» - Минимальная частота ядра, необходимая для работы всех датчиков на их текущих настроенных частотах.

«Simulation core frequency» - Частота, с которой работают внутренние компоненты предварительного сканирования.

«Compilation sheet frequency» - частота составления листов. Частота компиляции (модели Simulink).

«VisViewer frequency» - Частота визуализации эксперимента в рабочей форме «VisViewer».

2.3.2 Импорт эксперимента в «MATLAB&Simulink»

Для инициализации математической модели в программной среде «MATLAB&Simulink» необходимо произвести сборку эксперимента и импорт через механизм «Parse & Build Mechanism».

Данный механизм используется для анализа эксперимента, в первую очередь, на соответствие скорости моделирования. В случае сбоя пользователь может ввести новые значения для выявленных проблемных параметров.

Перед инициализацией математической модели необходимо нажать на следующие кнопки:

1. Parse (Рисунок 24, сноска 1);
2. Build (Рисунок 24, сноска 2);
3. Invoke Simulink Run Mode (Рисунок 24, сноска 3).

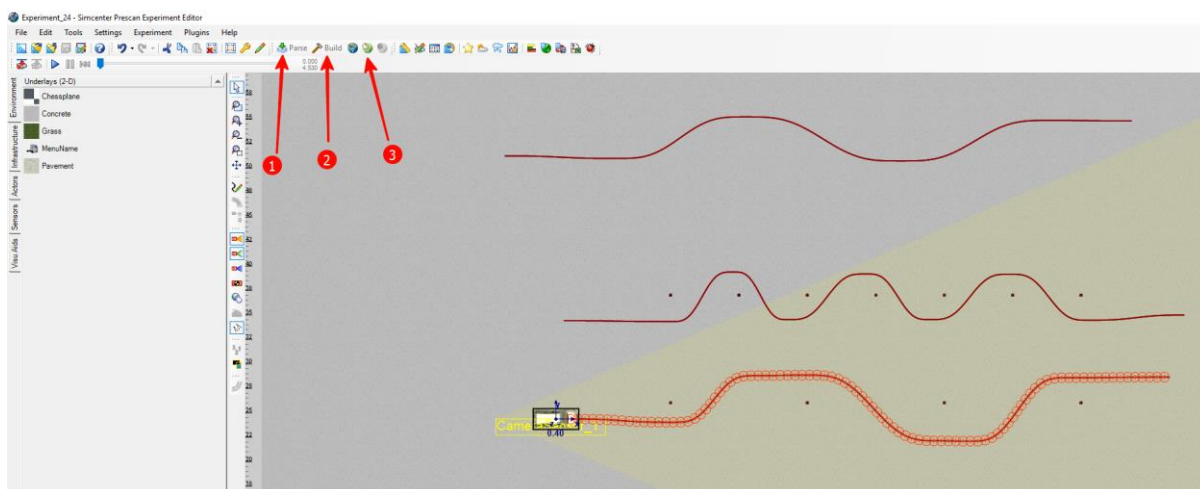


Рисунок 24. Этапы сборки проекта и симуляция в «MATLAB&Simulink»

После открытия главной формы «MATLAB» в командной строке отразится информация о синхронизации программных продуктов «MATLAB» и «Simcenter Prescan», а также отразятся данные из папки эксперимента ().

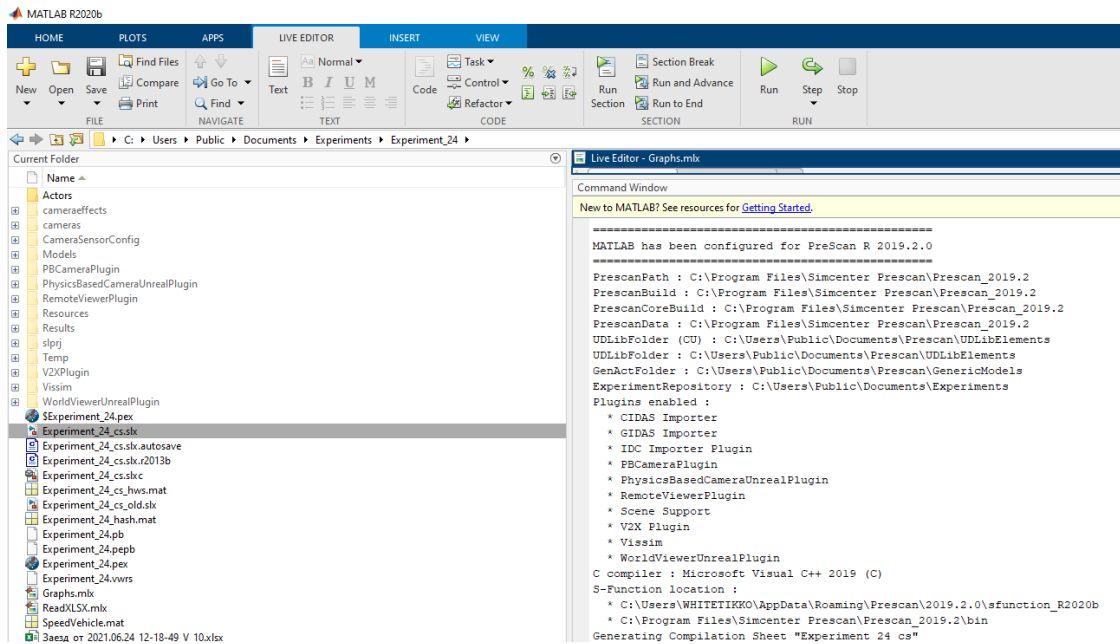


Рисунок 25. Синхронизация «Siemens Prescan» с «MATLAB&Simulink»

Для загрузки математической модели в «MATLAB&Simulink» необходимо в дереве проекта запустить файл формата «.slx» (Simulink Model) (Рисунок 25).

После открытия модели Simulink отобразятся объекты, которые используются в разрабатываемом эксперименте (Рисунок 26).

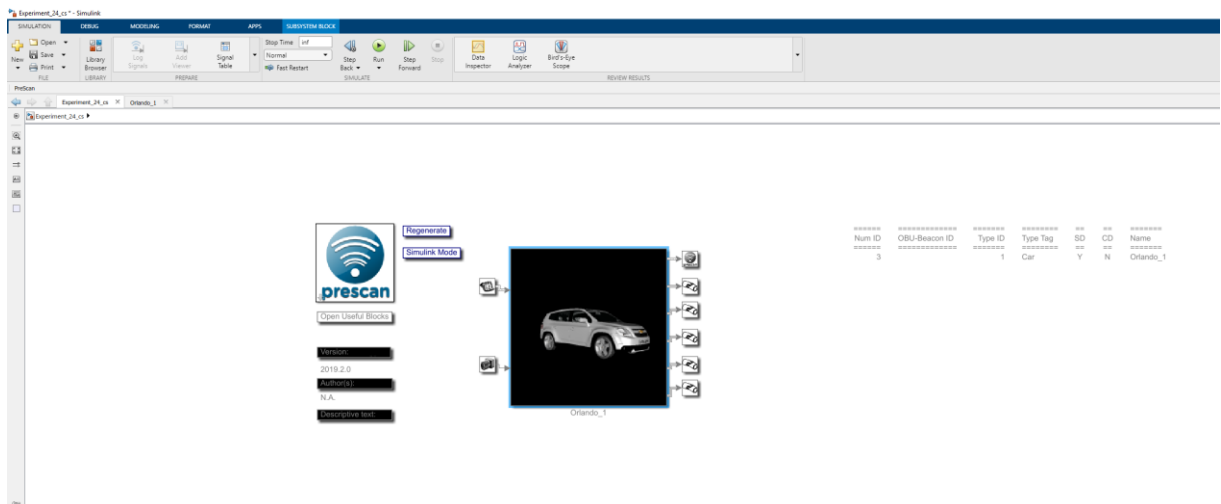


Рисунок 26. Объекты испытаний в «MATLAB&Simulink»

Для отображения математической модели поведения объекта необходимо нажать на нее двойным нажатием левой кнопки мышки (Далее – ЛКМ).

Типовая математическая модель объекта с привязкой к траектории движения выглядит следующим образом (Рисунок 27):

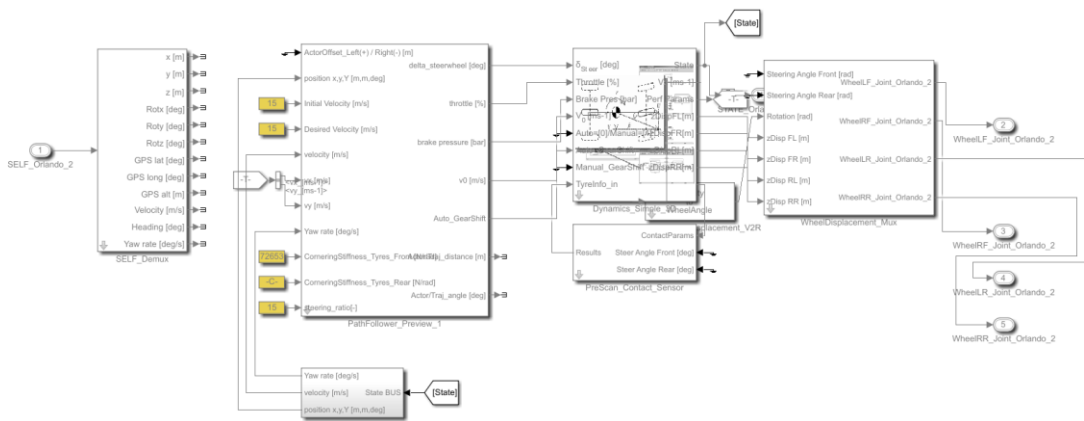


Рисунок 27. Стандартный вид математической модели

2.3.2.1 Блок «SELF_Demux»

Данный блок состоит из выходных данных объекта испытания – положения в системе координат эксперимента и координат GPS, а также абсолютную скорость объекта и направление по компасу.

Выходные параметры включают в себя:

Таблица 12. Выходные параметры блока «SELF_Demux»

Наименование параметра	Описание параметра
$x[m]$	положение объекта по оси x относительно системы осей эксперимента
$y[m]$	положение объекта по оси y относительно системы осей эксперимента;
$z[m]$	положение объекта по оси z относительно системы осей эксперимента
$rotx[deg]$	вращение транспортного средства относительно осей эксперимента (порядок вращения – rotx, roty, rotz)
$roty[deg]$	вращение транспортного средства относительно осей эксперимента (порядок вращения – rotx, roty, rotz)
$rotz[deg]$	вращение транспортного средства относительно осей эксперимента (порядок вращения – rotx, roty, rotz);
GPS Lat	боксовое положение объекта по GPS (глобальное позиционирование);
GPS Long	продольное положение объекта по GPS (глобальное позиционирование);
GPS alt	высота объекта по GPS (глобальное позиционирование);
Velocity [m/s]	абсолютная скорость объекта;

<i>Heading [deg]</i>	направление объекта по компасу (север = 0, восток = 90, юг = 180, запад = 270);
<i>Yaw rate [deg/s]</i>	угловая скорость, измерение курса в секунду.

2.3.2.2 Блок «Dynamics_Simple_3D»

3D – динамическая модель автомобиля позволяет производить предварительное сканирование в трехмерном измерении.

Блок состоит из компонентов, которые определяют поведение движения транспортного средства на основе исходных данных, зафиксированных при импорте модели в «Simcenter Prescan»:

1. «Engine» - Двигатель;
2. «Transmission» - Трансмиссия;
3. «Final Drive Ratio» - Передаточное число главной передачи;
4. «3D Chassis (Vehicle Dynamics)» - 3D-шасси (динамика автомобиля)
5. «ShiftLogic» - Логика переключения передач;
6. «Switch between Automatic and Manual Shift» - Выбор переключения между автоматическим и ручным переключением передач.

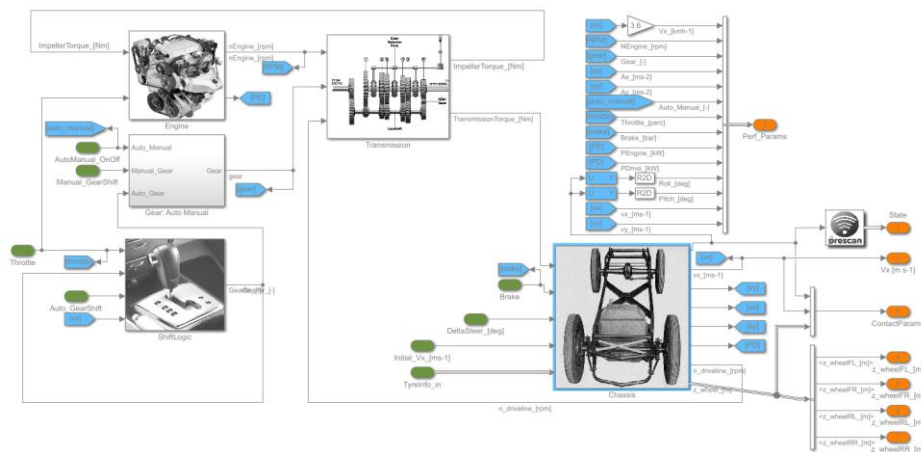
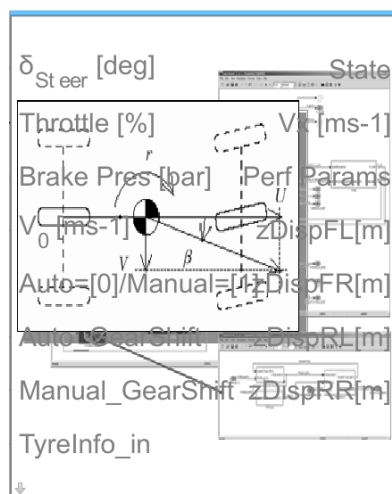


Рисунок 28. Механизмы расчета динамических характеристик. Формирование поведения автомобиля на дороге

Входными и выходными данными, на основании которых рассчитываются 6 предыдущих компонентов, определены в следующих подразделах (Рисунок 29, Таблица 13, Таблица 14).



Dynamics_Simple_3D

Рисунок 29. Входные и выходные данные «Dynamics_Simple_3D»

2.3.2.2.1 Входные параметры

Таблица 13. Входные данные «Dynamics_Simple_3D»

Наименование параметра	Описание параметра	Система измерения
<i>Δsteer</i>	Угол поворота рулевого колеса (для ТС соотношение РК и колеса равно 20)	[deg]
<i>Throttle</i>	% открытия дроссельной заслонки	[%]
<i>Brake Pres</i>	Сила нажатия на педаль тормоза	[bar]
<i>V0</i>	Исходная скорость	[m/s]
<i>Auto/Manual</i>	Переключение между автоматическим и ручным переключением передач	[-]
<i>Auto Gear</i>	Положение рычага для автоматического переключения передач [-1] – задняя передача. [0] – нейтральная передача. [1] – режим «Драйв»	[]
<i>Manual Gear</i>	Положение рычага для ручного переключения передач [-1] – задняя передача. [0] – нейтральная передача. [1 – макс. передача] – номер передачи	
<i>TyreInfo_in</i>	Сигналы, поступающие от блока Prescan_Contact_Sensor	

2.3.2.2.2 Выходные параметры

Таблица 14. Выходные данные «Dynamics_Simple_3D».

Наименование параметра	Описание параметра	Система измерения
<i>State</i>	Положение автомобиля	[-]
v_x	Текущая скорость	[m/s]
<i>Perf Params</i>	Параметры эффективности автомобиля	[multiple]
<i>zDispFL</i>	Вертикальное смещение переднего левого колеса	[m]
<i>zDispFR</i>	Вертикальное смещение переднего правого колеса	[m]
<i>zDispRL</i>	Вертикальное смещение заднего левого колеса	[m]
<i>zDispRR</i>	Вертикальное смещение заднего правого колеса	[m]
ContactParams	Позиционные выходные данные, которые будут использоваться в качестве входа в блок «Prescan_Contact_Sensor	[-]

2.3.3 Разработка модели инициализации данных

2.3.3.1 Модуль сбора данных

Для сбора модуля данных необходимо в рабочей области «MATLAB&Simulink» добавить блок «To Workspace», который позволяет записывать данные выбранных параметров (Рисунок 30):

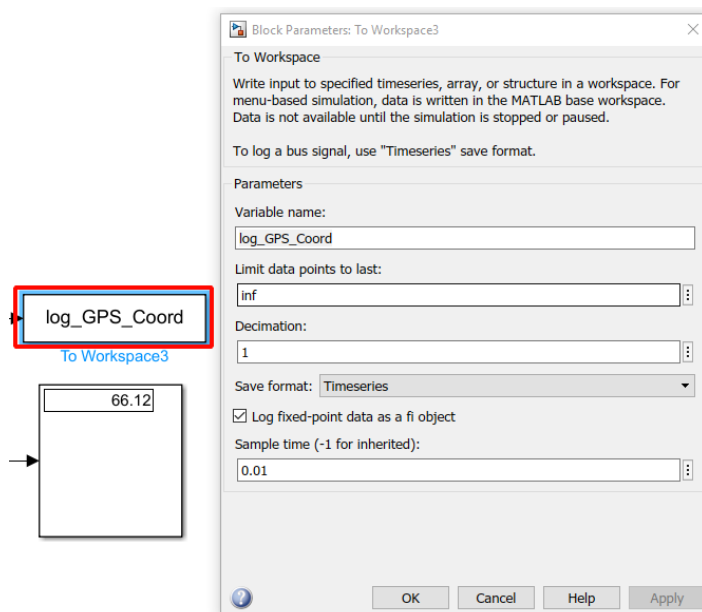


Рисунок 30. Блок записи данных в рабочую область «MATLAB»

Установим для поля «Sample time» значение «0.01», которое означает частоту обновления данных 100 Гц (100 записей в секунду).

Модуль сбора данных для каждого вида испытаний состоит из следующих блоков (Таблица 15):

Таблица 15. Блоки сбора данных и их входные параметры

Наименование блока	Параметры	Описание параметра	Частота обновления
Испытание «Змейка»			
log_Accel	Velocity [m/s]	Скорость объекта [м/с]	0.01
log_data	Delta_steerwheel [deg]	Угол поворота рулевого колеса [градус]	0.01
	Throttle [%]	% раскрытия дроссельной заслонки	
	Brake_Press [bar]	Сила нажатия на педаль тормоза [бар]	
log_GPS_Coord	Lat	Географические координаты широты	0.01
	Long	Географические координаты долготы	
	DistanceTraveled [m]	Пройденное расстояние [метр]	
Испытание «Разгон и торможение»			

log_Accel	Velocity [m/s]	Скорость объекта [м/с]	0.01
log_data	Delta_steerwheel [deg]	Угол поворота рулевого колеса [градус]	0.01
	Throttle [%]	% раскрытия дроссельной заслонки	
	Brake_Press [bar]	Сила нажатия на педаль тормоза [бар]	
log_GPS_Coord	Lat	Географические координаты широты	0.01
	Long	Географические координаты долготы	
	DistanceTraveled [m]	Пройденное расстояние [метр]	
log_RPM	Crankshaft speed [rpm]	Частота вращения коленчатого вала [об/мин]	0.01
Испытание «Выруливание от препятствия при фиксированном угле рулевого колеса»			
log_Accel	Velocity [m/s]	Скорость объекта [м/с]	0.01
log_data	Delta_steerwheel [deg]	Угол поворота рулевого колеса [градус]	0.01
	Throttle [%]	% раскрытия дроссельной заслонки	
	Brake_Press [bar]	Сила нажатия на педаль тормоза [бар]	
log_GPS_Coord	Lat	Географические координаты широты	0.01
	Long	Географические координаты долготы	
	DistanceTraveled [m]	Пройденное расстояние [метр]	
log_RPM	Crankshaft speed [rpm]	Частота вращения коленчатого вала [об/мин]	0.01
log_Lidar	Range [m]	Расстояние до препятствия (м)	0.01
Испытание «Круговое движение при фиксированном угле поворота рулевого колеса»			
log_Accel	Velocity [m/s]	Скорость объекта [м/с]	0.01
log_data	Delta_steerwheel [deg]	Угол поворота рулевого колеса [градус]	0.01
	Throttle [%]	% раскрытия дроссельной заслонки	
	Brake_Press [bar]	Сила нажатия на педаль тормоза [бар]	
log_GPS_Coord	Lat	Географические координаты широты	0.01
	Long	Географические координаты долготы	
	DistanceTraveled [m]	Пройденное расстояние [метр]	
log_RPM	Crankshaft speed [rpm]	Частота вращения коленчатого вала [об/мин]	0.01

Визуализация блоков для записи данных представлена на Рисунок 31.

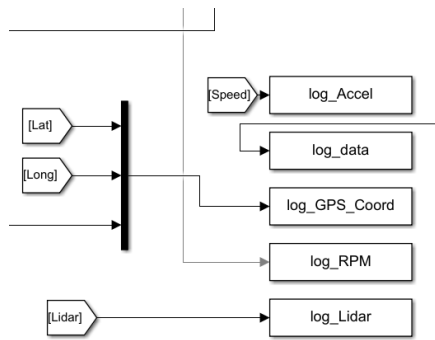


Рисунок 31. Блоки «To Workspace» для записи данных

Для записи данных в файл формата Excel «.xlsx» был написан скрипт.

Скрипт «SAVEXLSX.mlx» представлен в Листинг 1.

```

%%SAVE TO XLSX
time = datestr(now, 'yyyy.mm.dd_HH-MM-SS')
namexlsx = sprintf("Заезд_от_%s_V_%f.xlsx", time, SpeedVehicle)
Values = table(log_data.time, log_Accel.Data, log_data.signals.values, log_GPS_Coord.Data,
log_RPM.Data, log_Lidar.Data);
Values(1:8,:);
col_name = {'Время', 'Скорость движения', 'Угол поворота рулевого колеса', '% открытия
дрессельной заслонки', 'Сила нажатия на педаль тормоза', 'Широта', 'Долгота',
'Пройденный путь', 'Число оборотов коленчатого вала', 'Расстояние до препятствия'};
Time = sprintf('Время');
filename = sprintf(namexlsx);
Sheet = 1;
xlswrite(filename, col_name, Sheet, 'A1');
writetable(Values, filename, 'Sheet', Sheet, 'Range', 'A2');
  
```

Листинг 1. Запись данных параметров автомобиля. Сохранение в формате «EXCEL»

После запуска скрипта происходит сохранение данных в файл формата Excel «.xlsx» в виде «Заезд_от_2021.06.26_16-43-30_V_30.xlsx»

Пример загруженных данных в Excel представлен на Рисунок 32.

1	Время	Скорость движения	Угол поворота рулевого колеса	% открытия дроссельной заслонки	Сила нажатия на педаль тормоза	Широта	Долгота	Пройденный путь	Число оборотов колес/чел	Расстояние до препятствия
2	Var1	Var2	Var3_1	Var3_2	Var3_3	Var4_1	Var4_2	Var4_3	Var5	Var6
3	0	0	0	99	0	0,000220322	0,000357257	0,094935298	800	0
4	0,01	0,108317066	0	99	0	0,000220322	0,000357257	0,094935298	800	58
5	0,02	0,440683754	0	99	0	0,000220322	0,000357257	0,094935298	800,6444469	58
6	0,03	0,783910977	0	99	0	0,000220322	0,000357257	0,094935298	810,9353304	58
7	0,04	0,932203485	-0,731483203	99	0	0,000220322	0,000357258	0,094935298	825,1896706	58
8	0,05	0,933327774	-2,521167885	99	0	0,000220322	0,000357259	0,094935298	842,556697	58
9	0,06	0,908897684	-4,485463299	99	0	0,000220322	0,00035726	0,094935298	862,6531028	58
10	0,07	0,863381199	-6,260571478	99	0	0,000220322	0,000357262	0,094935298	885,128599	58
11	0,08	0,813851533	-7,86525681	99	0	0,000220322	0,000357266	0,094935298	909,6628261	58
12	0,09	0,765944591	-9,315894933	99	0	0,000220322	0,00035727	0,094935298	935,9615475	58
13	0,1	0,715475416	-10,62679285	99	0	0,000220322	0,000357275	0,094935298	963,7562427	58
14	0,11	0,663948662	-11,81219506	99	0	0,000220322	0,000357282	0,094935298	992,8000215	58
15	0,12	0,620693146	-12,88388132	99	0	0,000220322	0,00035729	0,094935298	1022,866873	58
16	0,13	0,594765064	-13,8530163	99	0	0,000220322	0,0003573	0,094935298	1053,749791	58
17	0,14	0,551875239	-14,72943949	99	0	0,000220322	0,000357311	0,094935298	1085,259489	58
18	0,15	0,615078296	-15,5226161	99	0	0,000220322	0,000357324	0,094935298	1117,223114	58
19	0,16	0,664292565	-16,23944163	99	0	0,000220322	0,000357339	0,094935298	1149,483158	58
20	0,17	0,736490892	-16,88867955	99	0	0,000220322	0,000357356	0,094935298	1181,89645	58
21	0,18	0,827149592	-17,47611994	99	0	0,000220322	0,000357375	0	1214,331943	58
22	0,19	0,931716677	-18,0083377	99	0	0,000220322	0,000357397	0	1246,653104	58
23	0,2	1,046152952	-18,48993961	99	0	0,000220322	0,000357421	0	1278,74977	58
24	0,21	1,167172115	-18,92636194	99	0	0,000220322	0,000357447	0	1310,505151	58
25	0,22	1,292246806	-19,32168786	99	0	0,000220322	0,000357476	0	1341,826607	58
26	0,23	1,419250959	-19,67986321	99	0	0,000220322	0,000357508	0	1372,637231	58
27	0,24	1,547513925	-20,00439796	99	0	0,000220322	0,000357544	0	1402,870265	58
28	0,25	1,676784643	-20,29842593	99	0	0,000220322	0,000357582	0	1432,467503	58
29	0,26	1,807624593	-20,56526596	99	0	0,000220322	0,000357623	0	1461,378716	58
30	0,27	1,941138029	-20,80631787	99	0	0,000220321	0,000357668	0,094935298	1489,561096	58
31	0,28	0,979566237	-21,0246103	98	0	0,000220321	0,000357716	0,094935298	1516,978729	58

Рисунок 32. Пример формирования данных в «Ехсел»

2.3.3.2 Определение пройденного пути

Для расчета расстояний на поверхности Земли используем сферическую тригонометрию (теорема косинусов).

Формула определения расстояния между двумя точками имеет следующий вид:

$$d = R * \arccos(\sin \varphi_1 * \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 * \cos \varphi_2 * \cos(\lambda_2 - \lambda_1)), \quad (2.1)$$

где:

d – расстояние между двумя точками;

R – радиус Земли (6371000 м);

φ_1, φ_2 – географическая широта;

λ_1, λ_2 – географическая долгота.

Также следует учитывать, что параметры географических координат по широте - φ_2 и долготе - λ_2 являются начальными точками φ_1, λ_1 и не должны изменяться во время движения.

Для инициализации пройденного пути разработана модель, позволяющая на основе данных координат GPS формировать значение пройденного расстояния в метрах (Рисунок 33).

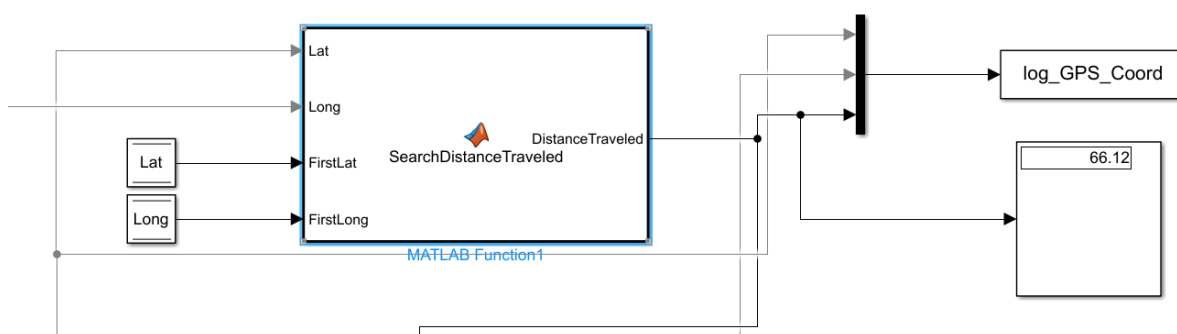


Рисунок 33. Модель расчета пройденного пути

Данная модель состоит из 4 входных и 1 выходного параметров (Таблица 16):

Таблица 16. Входные и выходные параметры модуля расчета пройденного пути

Наименование параметра	Описание параметра
Входные параметры	
Lat	Значения координат широты из блока «SELF_Demux»
Long	Значения координат долготы из блока «SELF_Demux»
FirstLat	Первое входное значение координата широты из блока «SELF_Demux»

Наименование параметра	Описание параметра
FirstLong	Первое входное значение координата долготы из блока «SELF_Demux»
Выходные параметры	
DistanceTraveled	Пройденный путь (в метрах)

В листинг описан алгоритм определения расстояния между двумя измеренными точками положения транспортного средства.

```
function DistanceTraveled = SearchDistanceTraveled(Lat, Long, FirstLat, FirstLong)
DistanceTraveled = 0;
x = sin(deg2rad(Lat))*sin(deg2rad(FirstLat));
y = cos(deg2rad(Lat))*cos(deg2rad(FirstLat))*cos(deg2rad(FirstLong-Long));
R = 6378137; %Радиус Земли (в метрах)
DistanceTraveled = (R*acos(x+y));
end
```

Листинг 2. Программный код алгоритма определения расстояния между двумя точками координат широты и долготы

2.3.3.3 Обработка экспериментальных данных

Для обработки экспериментальных данных был написан скрипт «ReadXLSX» через модуль «Live Script» (Листинг 3).

```
file = "Заезд_от_2021.06.27_05-44-02_V_15.xlsx";
log_import = readmatrix(file);
filename = sprintf(file)
NameFig = sprintf('Графики заезда "%s"', filename)

figure ("Name", NameFig, "NumberTitle",'off')
% set(gcf, 'Position', [10 10 2560 1080])
nexttile
plot(log_import(:,1), log_import(:,2))
hold on
grid on
xlabel('Время (секунды)')
ylabel('Скорость (км/ч)')
yyaxis right
ylabel('Число оборотов коленчатого вала (rpm)')
plot(log_import(:,1), log_import(:,9))
maxspeed = max(log_import(:,2))
maxspeedstr = sprintf('Максимальная скорость ТС - %.1f км/ч', maxspeed);
maxRPM = max(log_import(:,9))
maxRPMstr = sprintf('Максимальное число оборотов коленчатого вала - %.1f об/мин',
maxRPM)
legend(maxspeedstr, maxRPMstr, 'Location','southoutside')
title('График зависимости скорости и числа оборотов коленчатого вала от времени')

nexttile
plot(log_import(:,8), log_import(:,2))
hold on
grid on
xlabel('Пройденный путь (м)')
ylabel('Скорость (км/ч)')
yyaxis right
ylabel('Число оборотов коленчатого вала (rpm)')
plot(log_import(:,8), log_import(:,9))
maxDistance = max(log_import(:,8))
maxDiststr = sprintf('Пройденный путь составил - %.1f м', maxDistance);
legend(maxDiststr, 'Число оборотов коленчатого вала (rpm)', 'Location','southoutside')
title('График зависимости скорости и числа оборотов коленчатого вала от пройденного
пути')

figure ("Name", NameFig, "NumberTitle",'off')
% set(gcf, 'Position', [10 10 2560 1080])
nexttile
plot(log_import(:,8), log_import(:,3))
hold on
grid on
axis auto
xlabel({'Пройденный путь (м)'})
```

```

ylabel('Угол поворота рулевого колеса (градусы)')
yyaxis right
ylabel('Скорость (км/ч)')
plot(log_import(:,8), log_import(:,2))
legend('Угол поворота рулевого колеса (градусы)', 'Скорость (км/ч)', 'Location',
'southoutside')
title('График зависимости угла поворота рулевого колеса и скорости от пройденного
пути')

nexttile
plot(log_import(:,1), log_import(:,3))
legend('Угол поворота рулевого колеса (градусы)', 'Location', 'southoutside')
hold on
grid on
xlabel('Время (с)')
ylabel('Угол поворота рулевого колеса (градусы)')
title('График зависимости угла поворота рулевого колеса от времени')

figure ("Name", NameFig, "NumberTitle", 'off')
% set(gcf, 'Position', [10 10 2560 1080])
nexttile
plot(log_import(:,1), log_import(:,2))
hold on
grid on
xlabel({'Время (с)'})
ylabel('Скорость (км/ч)')
yyaxis right
ylabel('% открытия дроссельной заслонки (%)')
plot(log_import(:,1), log_import(:,4))
legend('Скорость (км/ч)', '% открытия дроссельной заслонки', 'Location', 'southoutside')
title('График зависимости скорости движения и % нажатия на педаль газа от времени')

nexttile
plot(log_import(:,1), log_import(:,10))
hold on;
grid off
xlabel('Время (с)')
ylabel('Дистанция до объекта (м)')
title('График зависимости дистанции до объекта от времени')
legend('Дистанция до объекта (м)', 'Location', 'southoutside')

figure ("Name", NameFig, "NumberTitle", 'off')
nexttile
plot(log_import(:,1), log_import(:,2))
hold on
grid on
xlabel({'Время (с)'})
ylabel('Скорость (км/ч)')
yyaxis right
ylabel('Сила нажатия на педаль тормоза (бар)')
plot(log_import(:,1), log_import(:,5))
legend('Скорость (км/ч)', 'Сила нажатия на педаль тормоза (бар)', 'Location', 'southoutside')

```

```

title('График зависимости скорости движения и силы нажатия на педаль тормоза от времени')
nexttile
plot(log_import(:,8), log_import(:,2))
hold on
grid on
xlabel({'Пройденный путь (м)'})
ylabel('Скорость (км/ч)')
yyaxis right
ylabel('Сила нажатия на педаль тормоза (бар)')
plot(log_import(:,8), log_import(:,5))
legend('Скорость (км/ч)', 'Сила нажатия на педаль тормоза (бар)', 'Location', 'southoutside')
title('График зависимости скорости движения и силы нажатия на педаль тормоза от пути')

NameFigDist = sprintf('Маршрут заезда "%s"', filename)
figure ("Name", NameFigDist, "NumberTitle", 'off')
geodensityplot(log_import(:,6), log_import(:,7), 'Radius', 2);
hold on;
grid off
x = (log_import(:,6));
x1 = x(1); %начальная точка широты
y = (log_import(:,7));
y1 = y(1); %начальная точка долготы
geoplot(log_import(:,6), log_import(:,7), 'LineWidth', 2);
geoscatter(log_import(:,6), log_import(:,7), 'filled')
geobasemap('streets')
geolimits([(x1-0.0004) (x1+0.0004)], [(y1-0.0004) (y1+0.0004)])
title('Построение маршрута заезда')

```

Листинг 3. Программный код скрипта «ReadXLSX» для обработки данных испытаний в виде графиков и маршрута

Примеры результата выполнения скрипта обработки данных в виде графиков и маршрута представлены на рис.

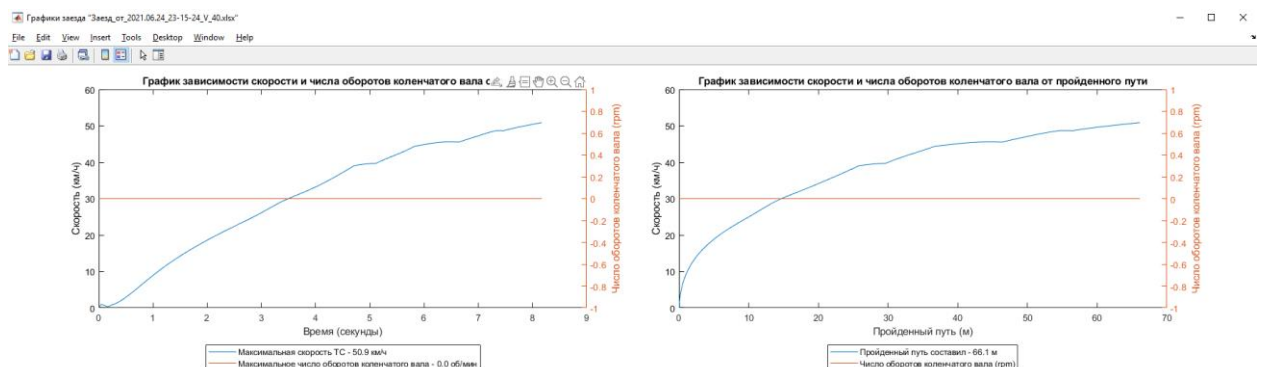


Рисунок 34. Пример сформированных графиков через скрипт «ReadXLSX» №1

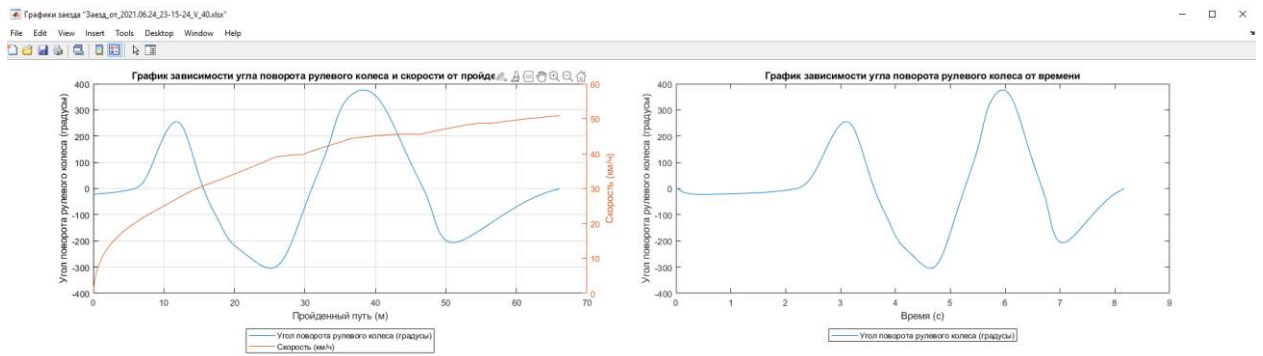


Рисунок 35. Пример сформированных графиков через скрипт «ReadXLSX» №2

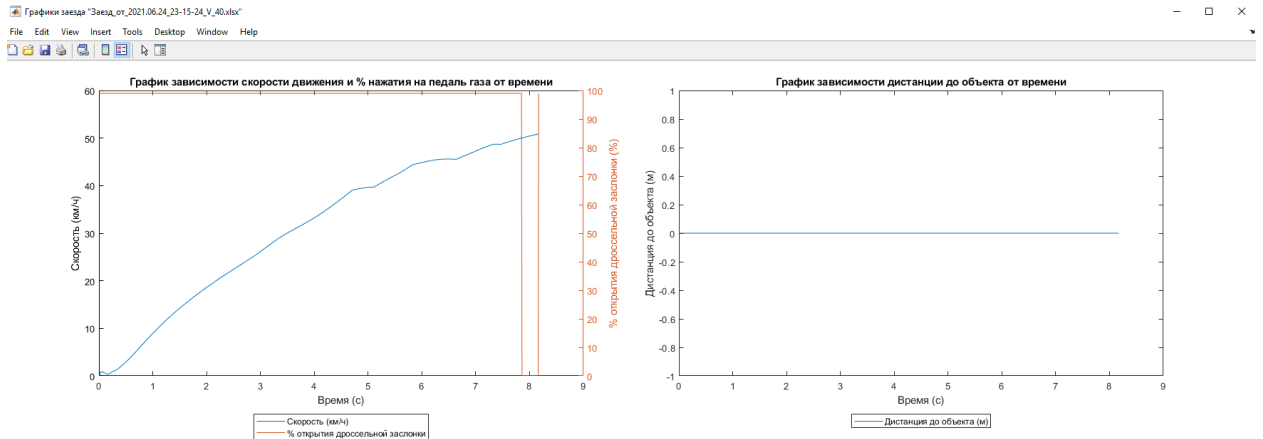


Рисунок 36. Пример сформированных графиков через скрипт «ReadXLSX» №3

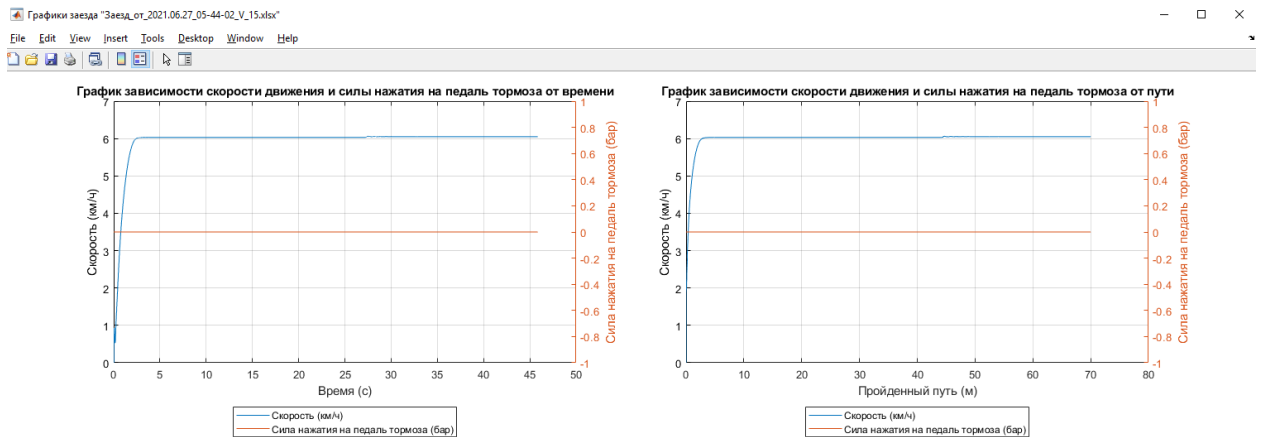


Рисунок 37. Пример сформированных графиков через скрипт «ReadXLSX» №4

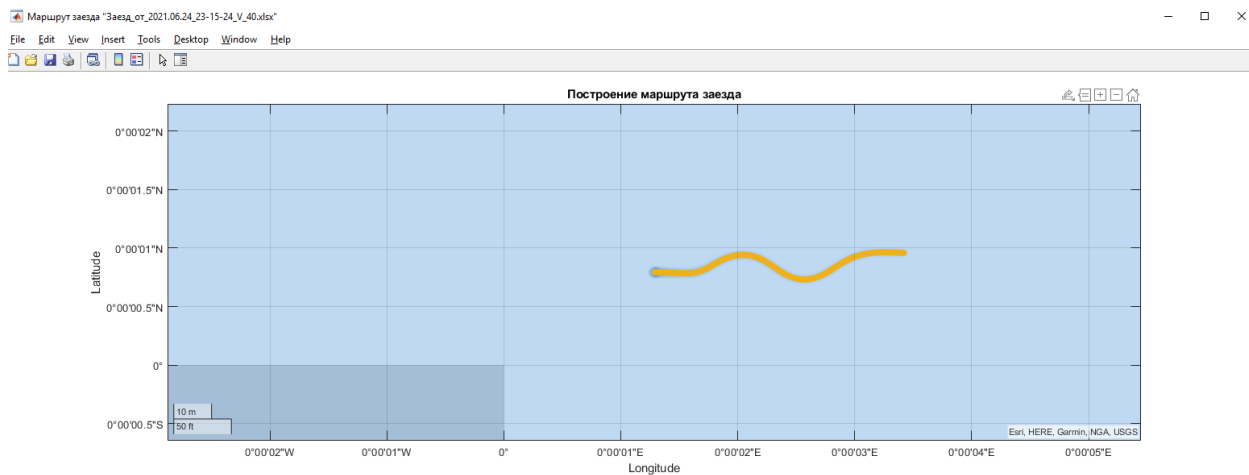


Рисунок 38. Пример сформированного маршрута через скрипт «ReadXLSX»

Глава 3 ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

3.1 Объект испытаний

Объектом испытаний является высокоавтоматизированное транспортное средство Chevrolet Orlando 1.8 6AT 2012 (Рисунок 39).



Рисунок 39. Внешний вид цифрового двойника

Динамические и технические характеристики представлены в разделе 2.2.

3.2 Проектирование испытаний

3.2.1.1 Программа испытаний

3.2.1.1.1 Проектирование маршрута для испытания «Змейка»

Используя типовые решения программного продукта «Simcenter Prescan», построим маршрут заезда «Змейка»:

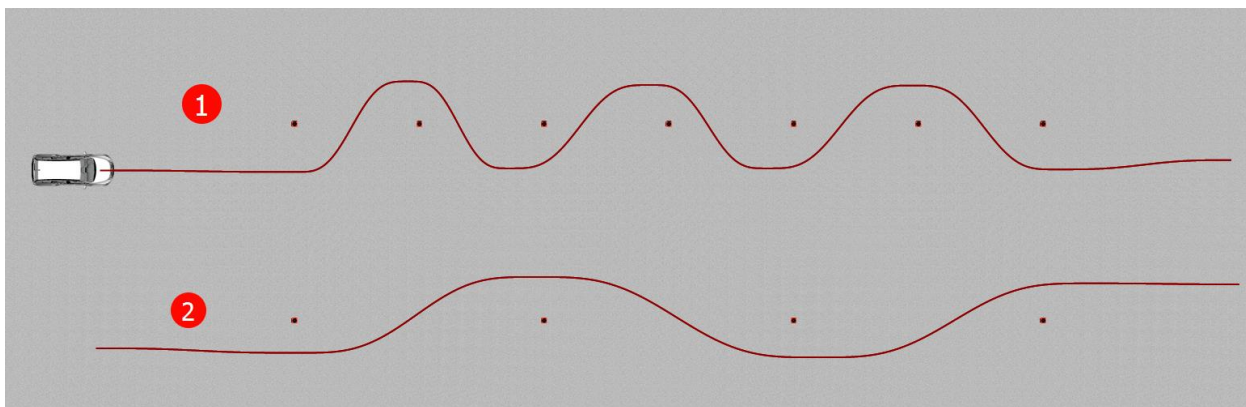


Рисунок 40. Разметка испытания «Змейка»

Данное испытание будет состоять из двух маршрутов заезда:

1. Объезд ряда препятствий по траектории, напоминающей движение змеи, не выезжая за разметку испытания. Препятствиями являются конусы в количестве 7 штук. Расстояние препятствий друг от друга составляет – 7 м. Общее расстояние разметки испытания «Змейка» - 42м» (Рисунок 40, сноска 1).
2. Объезд препятствий в количестве 4 штук. Расстояние препятствий друг от друга составляет – 14 м. Общее расстояние разметки испытания «Змейка» - 42м (Рисунок 40, сноска 2).

3.2.1.1.2 Проектирование маршрута для испытания «Разгон и торможение»

Целью дорожного испытания «Разгон и торможение» является вариация прямолинейного движения транспортного средства и последующее торможение при достижении различных скоростей:

1. Разгон от 0 до 50 и последующее торможение;
2. Разгон от 0 до 60 и последующее торможение.

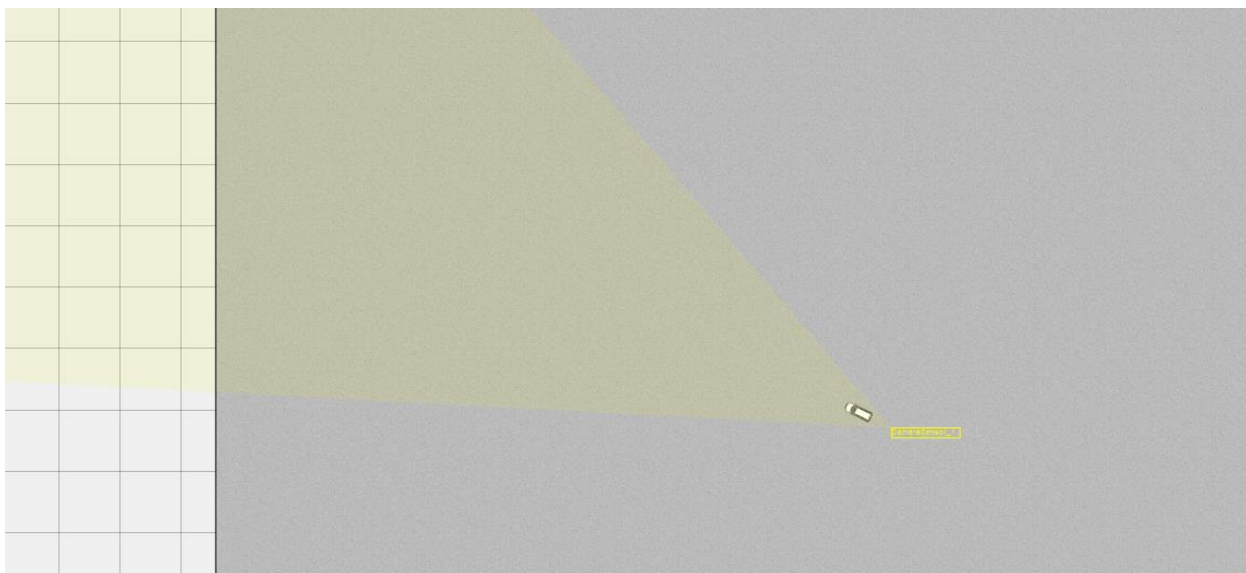


Рисунок 41. Маршрут для испытания «Разгон и торможение»

3.2.1.1.3 Проектирование маршрута для испытания «Выруливание от препятствия»

Целью данного испытания является предотвращение наезда на препятствие. В роли препятствия выступает конус. В случае если расстояние от движущегося объекта до препятствия будет составлять менее чем 10 метров, АТС предпримет выкруливание рулевого колеса от препятствия на 90 градусов в левую сторону движения.



Рисунок 42. Маршрут для испытания «Выруливание от препятствия»

3.3 Протокол полигонных испытаний

Общее количество проведенных испытаний – 24. Этапы дорожных испытаний и промежуточные результаты фиксировались в протоколе полигонных испытаний, представленном в Таблица 24.

Таблица 17. Протокол полигонных испытаний Chevrolet Orlando 1.8 6AT 2012

Первый день (24.06.2021)					
№	Время	Тип испытания	Скорость	Имя файла	Комментарий
1	12:18:49	Змейка	10	Заезд_от_2021.06.24_12-18-49_V_10.xlsx	
2	12:25:34	Змейка	15	Заезд_от_2021.06.24_12-25-34_V_15.xlsx	
3	12:44:04	Змейка	20	Заезд_от_2021.06.24_12-44-04_V_20.xlsx	
4	14:00:48	Змейка	30	Заезд_от_2021.06.24_14-00-48_V_30.xlsx	
5	23:15:24	Змейка	40	Заезд_от_2021.06.24_23-15-24_V_40.xlsx	
Второй день (27.06.2021)					
№	Время	Тип испытания	Скорость	Имя файла	Комментарий
6	01:30:09	Разгон и торможение	0 → 50	Заезд_от_2021.06.27_01-30-09_V_50.xlsx	
7	02:04:50	Разгон и торможение	0 → 60	Заезд_от_2021.06.27_02-04-50_V_60.xlsx	
8	05:44:02	Выруливание от цели	4,5	Заезд_от_2021.06.27_05-44-02_V_15.xlsx	

3.4 Обработка экспериментальных данных виртуальных испытаний

Для записи и обработки экспериментальных данных дорожных заездов использовались следующие программные продукты:

1. «Simcenter Prescan»;
2. «MATLAB&Simulink»;
3. «Microsoft Excel».

3.4.1 Испытание «Змейка»

3.4.1.1 Дорожный заезд №1 при скорости движения транспортного средства 10 км/ч

3.4.1.1.1 Построение траектории движения

Сбор данных географического местоположения широты и долготы происходил из блока «SELF_Demux» с частотой измерения 100 Гц. Запись данных осуществлялась в программном продукте «MATLAB&Simulink».

Для определения местоположения траектории движения транспортного средства на основе данных широты и долготы использовался скрипт, описанный в разделе 2.3.3.2. После запуска скрипта и обработки данных заезда, был получен график пройденного пути (Рисунок 43).

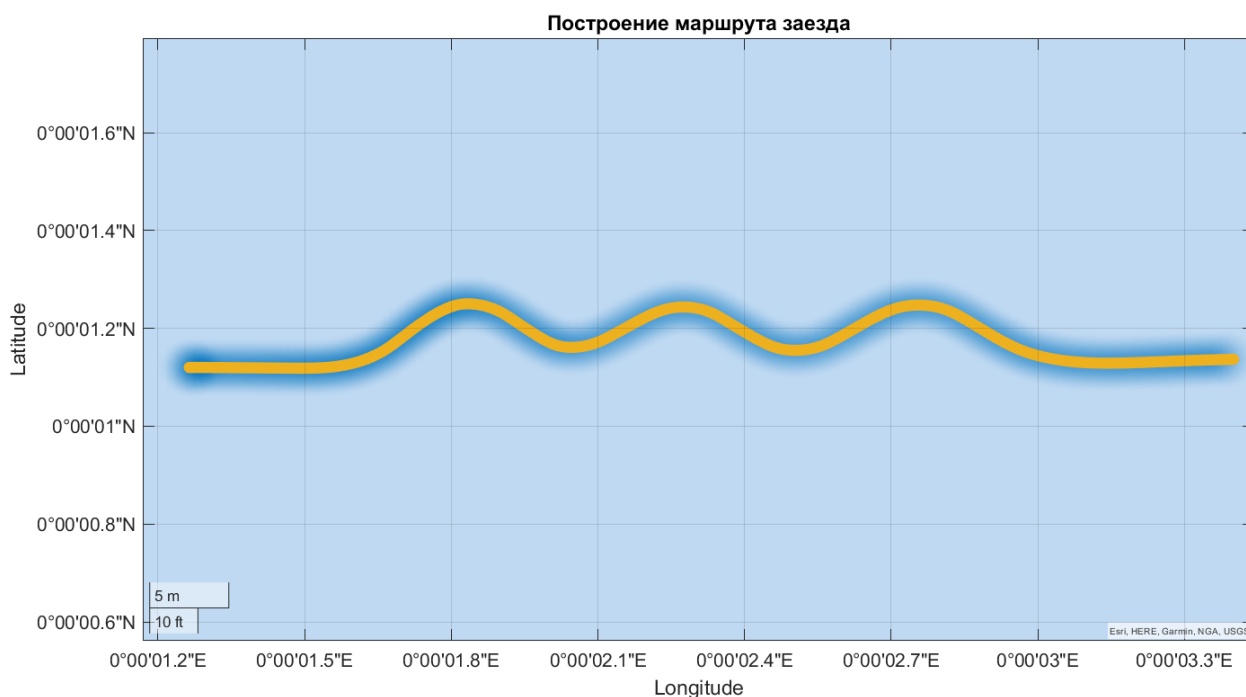


Рисунок 43. График траектории движения при скорости 10 км/ч

3.4.1.1.2 Построение графика зависимости скорости, пройденному пути и углу поворота рулевого колеса

Для построения графика по данным скорости, пройденному пути и углу поворота рулевого колеса был написан специализированный скрипт, который позволяет формировать графики по записанным данным испытаний. Графики зависимостей трех параметров, сформированных в программной среде «MATLAB&Simulink», представлен на (Рисунок 44, Рисунок 45).



Рисунок 44. График зависимости угла поворота рулевого колеса и скорости от пройденного пути

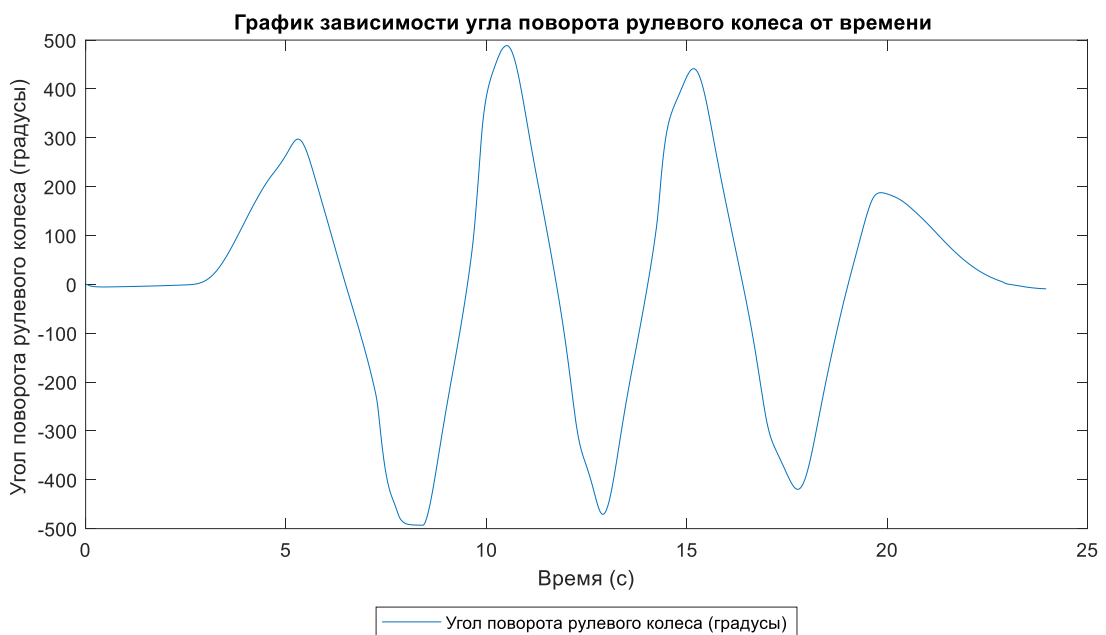


Рисунок 45. График зависимости угла поворота рулевого колеса от времени

На основании данных графика зависимостей трех параметров сформируем результаты, достигнутые при выруливании транспортного средства от препятствий в виде Таблица 18.

Таблица 18. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» от времени

№ препятствия	Параметры			
	t	V	S	α
0→1	2.84	9.4694	6.3312	2.45958

1→2	5.3	9.08421	12.4103	297.311
2→3	8.41	10.4771	19.6691	-492.53
3→4	10.51	11.9292	25.0784	488.738
4→5	12.91	12.4967	32.7029	-470.7
5→6	15.17	12.4349	37.5274	441.421
6→7	17.77	12.2714	47.7027	-419.584

В Таблица 18 отражены значения, которые были получены при достижении максимального угла поворота руля в каждую сторону движения.

Иными словами, зафиксирован момент выруливания рулевого колеса от препятствия.

Максимальная скорость при проведении испытания составила 12.4967 км/ч на 32.7029 метре пройденного пути. Максимальный угол поворота руля в правую сторону движения составил 492.53 градуса, в левую 488.738.

3.4.1.2 Дорожный заезд №2 при скорости движения транспортного средства 15 км/ч

3.4.1.2.1 Построение траектории движения

Определим траекторию движения транспортного средства для заезда «Змейка» при скорости транспортного средства 15 км/ч (Рисунок 46).

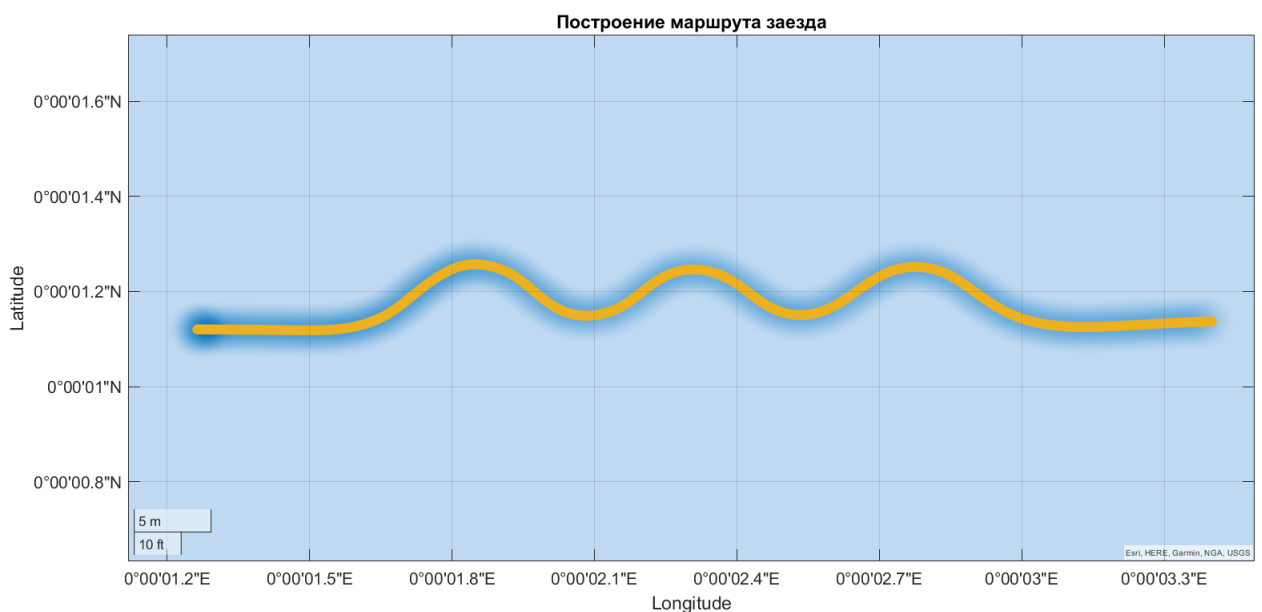


Рисунок 46. График траектории движения при скорости 15 км/ч

3.4.1.2.2 Построение графика зависимости скорости по GPS, пройденному пути по GPS и углу поворота рулевого колеса

Графики зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса», сформированных в программной среде «MATLAB», представлены на Рисунок 47, Рисунок 48.



Рисунок 47. График зависимости угла поворота рулевого колеса и скорости от пройденного пути

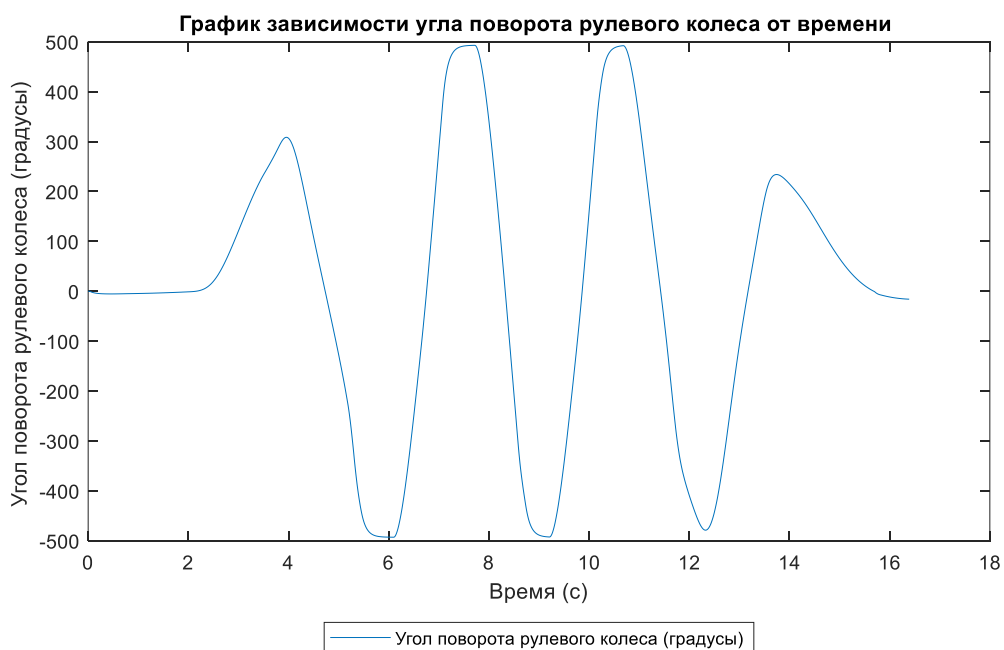


Рисунок 48. График зависимости угла поворота рулевого колеса от времени

На основании данных графиков зависимостей параметров сформируем результаты, достигнутые при выруливании транспортного средства от препятствий в виде Таблица 19.

Таблица 19. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» от времени

№ препятствия	Параметры			
	t	V	S	α
0→1	2.43	13.4161	7.01242	12.5851
1→2	3.96	13.6919	12.5389	308.476
2→3	6.1	16.7253	20.3387	-492.926
3→4	7.72	18.6528	26.9675	492.823
4→5	9.21	18.7492	33.8846	-492.479
5→6	10.69	18.6706	40.4235	492.027
6→7	12.32	18.2166	47.9303	-478.792

В Таблица 19. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» отражены значения параметров, которые были получены при достижении максимального угла поворота руля в каждую сторону движения. Иными словами, зафиксирован момент выруливания рулевого колеса от препятствия.

Максимальная скорость при проведении испытания составила 18.7492 км/ч на 33,8846 метре пройденного пути. Максимальный угол поворота руля в правую сторону движения составил 492,926 градуса, в левую 492,823.

Основываясь на данных заезда, можно сделать вывод, что высокоавтоматизированное транспортное средство совершало максимальное выруливание рулевым колесом при максимальном значении в 493.2 градуса в одну сторону.

3.4.1.3 Дорожный заезд №3 при скорости движения транспортного средства 20 км/ч

3.4.1.3.1 Построение траектории движения

Определим траекторию движения транспортного средства для заезда «Змейка» при скорости транспортного средства 20 км/ч (Рисунок 49).

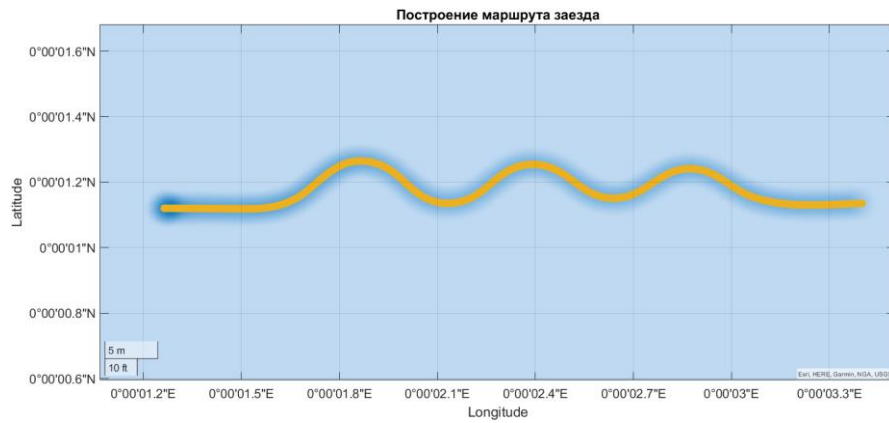


Рисунок 49. График траектории движения при скорости 20 км/ч

3.4.1.3.2 Построение графика зависимости скорости по GPS, пройденному пути по GPS и углу поворота рулевого колеса

Графики зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса», представлен на Рисунок 50, Рисунок 51.



Рисунок 50. График зависимости угла поворота рулевого колеса и скорости от пройденного пути

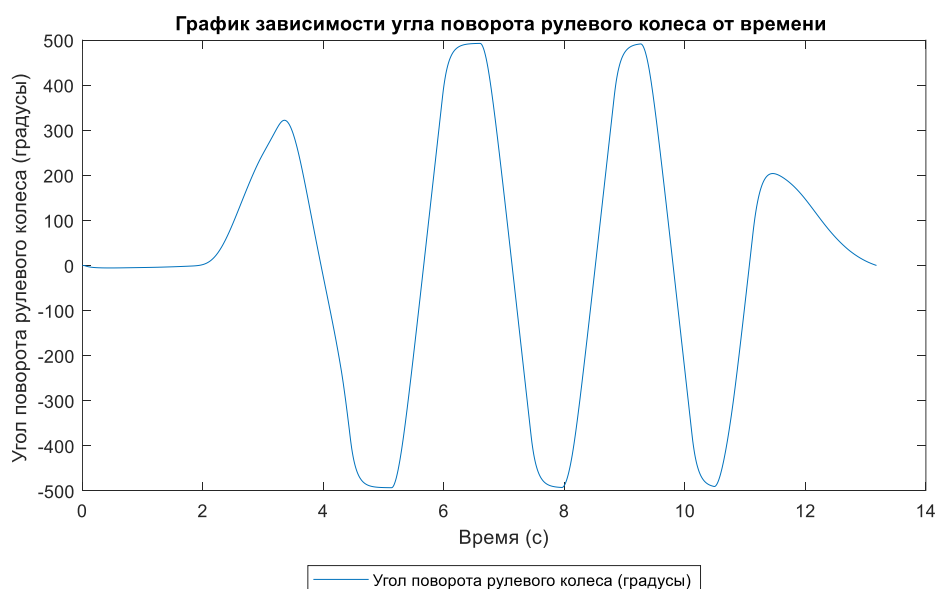


Рисунок 51. График зависимости угла поворота рулевого колеса от времени

На основании данных графиков сформируем результаты, достигнутые при выруливании транспортного средства от препятствий в виде Таблица 20.

Таблица 20. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» от времени

№ препятствия	Параметры			
	t	V	S	α
0→1	1.94	17.0201	6.102	0.401416
1→2	3.35	17.4969	12.6124	322.237
2→3	5.13	21.5238	21.001	-492.892
3→4	6.6	23.2586	28.4854	492.785
4→5	7.96	23.3177	36.2772	-492.362
5→6	9.27	23.1817	43.541	491.589
6→7	10.49	22.9616	50.6865	-490.209

На Таблица 20 отражены значения параметров, которые были получены при достижении максимального угла поворота руля в каждую сторону движения.

Максимальная скорость при проведении испытания составила 23.3177 км/ч на 36.2772 метре пройденного пути.

Основываясь на данных заезда, можно сделать вывод, что небольшое расстояние между конусами (~7м) повлекло за собой наезд на препятствия № 4, 5, 6, 7 (Рисунок 52).

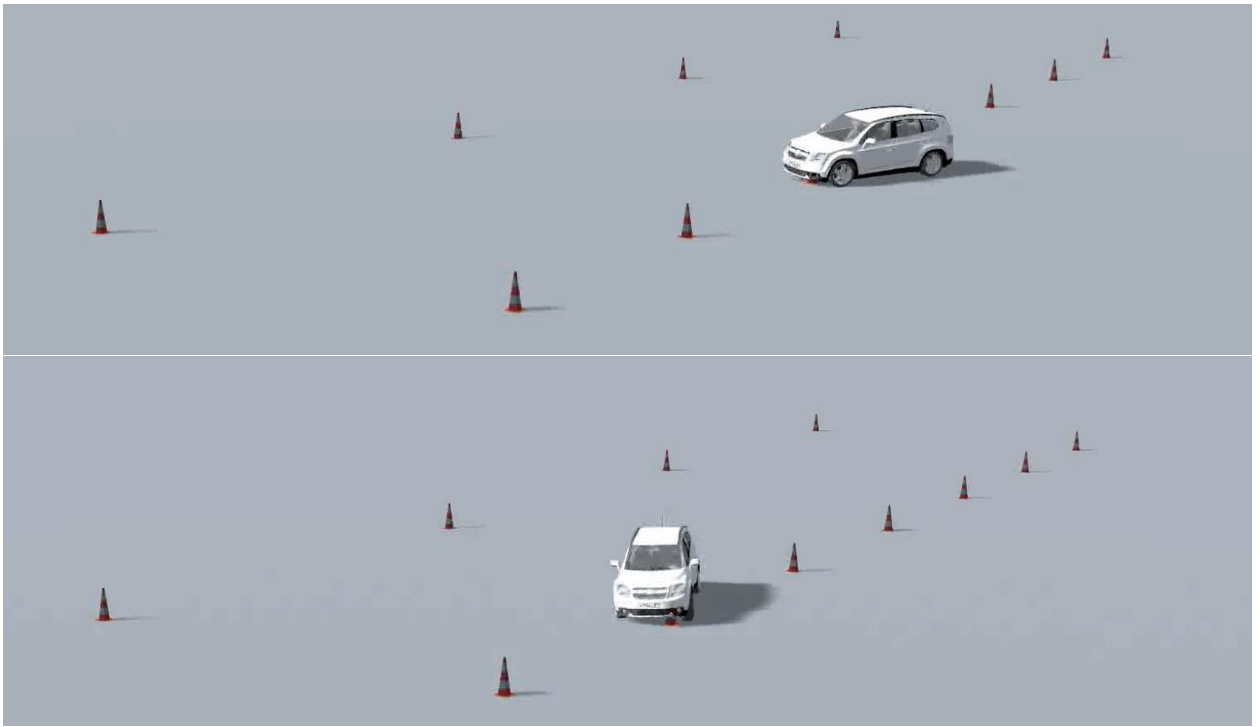


Рисунок 52. Наезд на препятствие при скорости движения АТС 20 км/ч

3.4.1.4 Дорожный заезд №4 при скорости движения транспортного средства 30 км/ч

По причине наезда транспортного средства на препятствия и маленького расстояния между конусами, было принято решение убрать конусы № 4, 5, 6, 7.

Текущее расстояние между конусами составило 14м. Разметка испытания представлена на Рисунок 53.

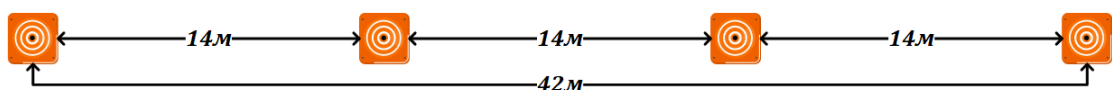


Рисунок 53. Разметка испытания «Змейка»

Фотография испытания с новой разметкой представлена на Рисунок 54.

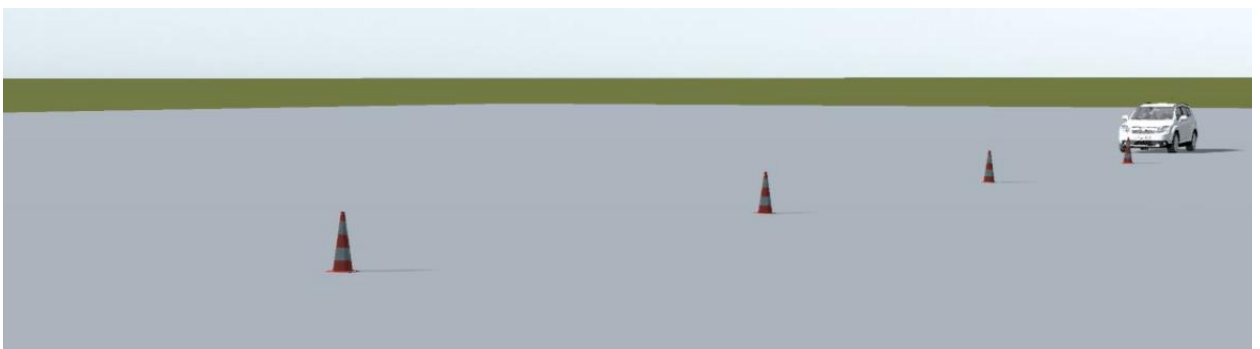


Рисунок 54. Испытание с новой разметкой

3.4.1.4.1 Построение траектории движения

Определим траекторию движения транспортного средства для заезда «Змейка» при скорости транспортного средства 30 км/ч (Рисунок 55).

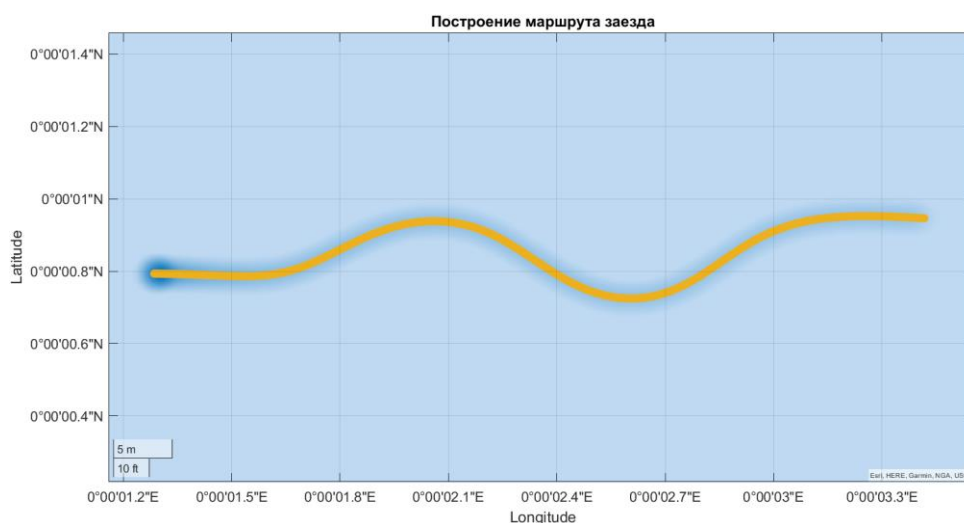


Рисунок 55. График траектории движения при скорости 30 км/ч

3.4.1.4.2 Построение графика зависимости скорости по GPS, пройденному пути по GPS и углу поворота рулевого колеса

Графики зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса», представлен на (Рисунок 56, Рисунок 57).

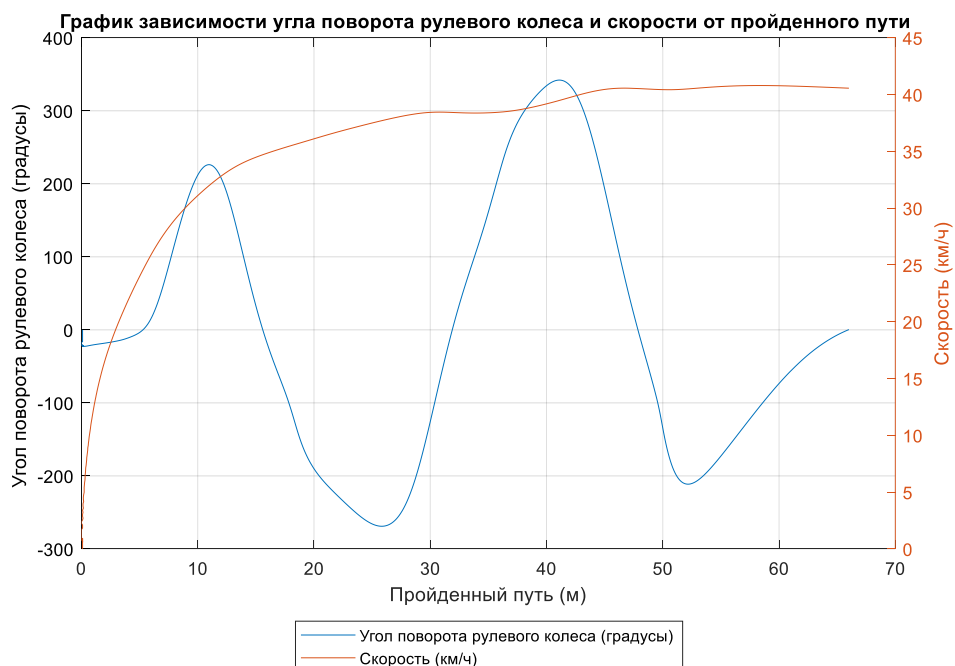


Рисунок 56. График зависимости угла поворота рулевого колеса и скорости от пройденного пути



Рисунок 57. График зависимости угла поворота рулевого колеса от времени

На основании данных графика зависимостей параметров сформируем результаты, достигнутые при выруливании транспортного средства от препятствий в виде Таблица 21.

Таблица 21. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» от времени

№ препятствия	Параметры			
	t	V	S	α
0→1	1.61	24.6961	5.35758	1.11303
1→2	2.32	32.0031	10.9947	226.212
2→3	3.88	37.7043	25.8403	-268.949
3→4	5.48	39.4745	41.0783	342.045

На Таблица 21 отражены значения параметров, которые были получены при достижении максимального угла поворота руля в каждую сторону движения.

Максимальная скорость при проведении испытания составила 39.4745 км/ч на 41.0783 метре пройденного пути.

3.4.1.5 Дорожный заезд №5 при скорости движения транспортного средства 40 км/ч

3.4.1.5.1 Построение траектории движения

Определим траекторию движения транспортного средства для заезда «Змейка» при скорости транспортного средства 40 км/ч (Рисунок 58).

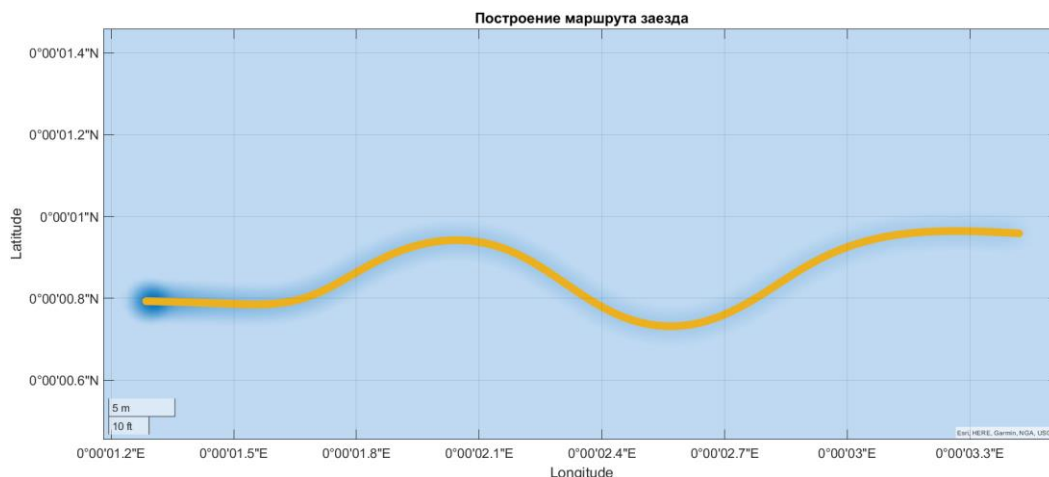


Рисунок 58. График траектории движения при скорости 40 км/ч

3.4.1.5.2 Построение графика зависимости скорости по GPS, пройденному пути по GPS и углу поворота рулевого колеса

Графики зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса», представлены на Рисунок 59, Рисунок 60.

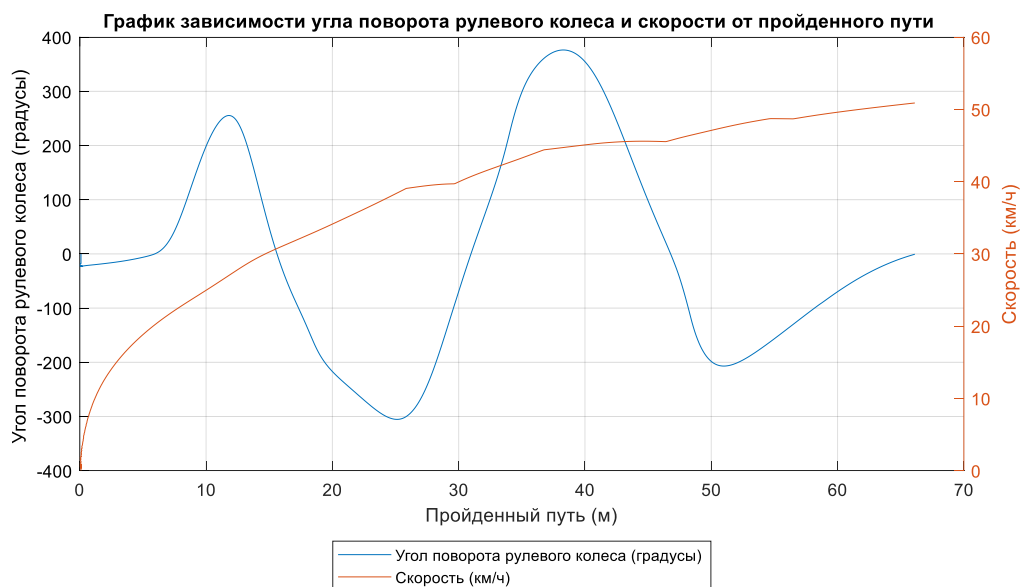


Рисунок 59. График зависимости угла поворота рулевого колеса и скорости от пройденного пути

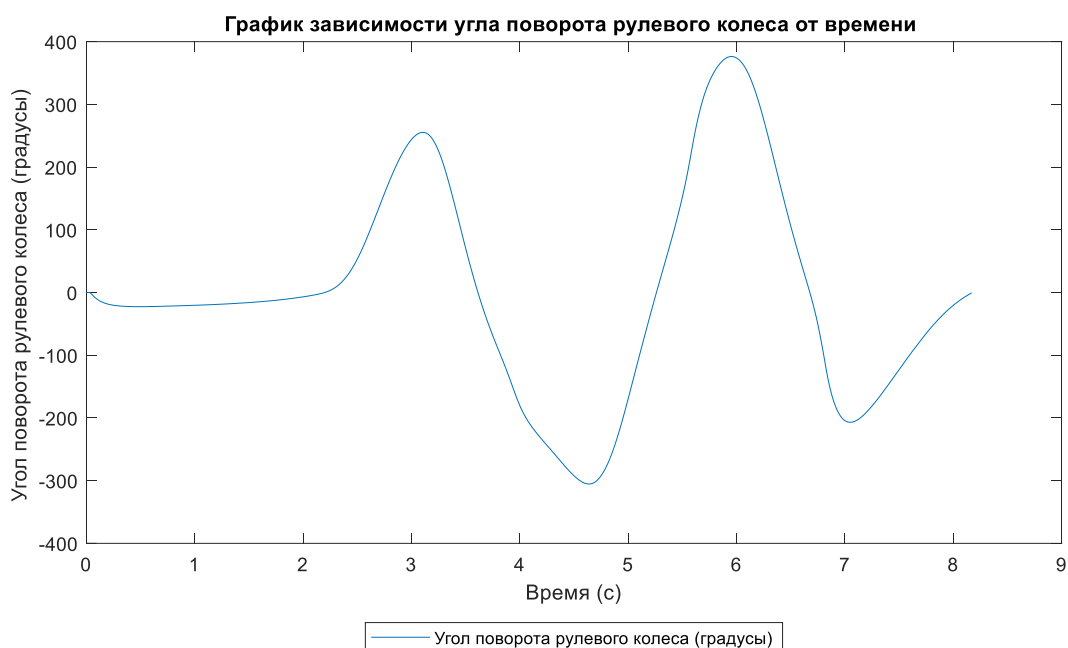


Рисунок 60. График зависимости угла поворота рулевого колеса от времени

На основании данных графиков зависимостей параметров сформируем результаты, достигнутые при выруливании транспортного средства от препятствий в виде Таблица 22.

Таблица 22. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» от времени

№ препятствия	Параметры			
	t	V	S	α
0→1	2.29	20.8651	6.44554	7.15194
1→2	3.11	27.0546	11.8364	255.375
2→3	4.64	38.4358	25.1359	-305.339
3→4	5.95	44.7414	38.2375	376.294

На Таблица 22 отражены значения параметров, которые были получены при достижении максимального угла поворота руля в каждую сторону движения.

Максимальная скорость при проведении испытания составила 37.788 км/ч на 47.831 метре пройденного пути. Максимальный угол поворота руля в правую сторону движения составил 170.883 градуса, в левую 147.181.

3.4.2 Испытание «Разгон и торможение»

Обработка экспериментальных данных текущего испытания включает в себя сбор полученных значений по следующим параметрам:

1. Скорость движения по GPS;
2. Пройденное расстояние по GPS;
3. % нажатия на педаль газа;
4. % нажатия на педаль тормоза;
5. Число оборотов коленчатого вала (RPM).

3.4.2.1 Дорожный заезд №1 при достижении скорости транспортного средства 50 км/ч

3.4.2.1.1 Построение траектории движения

По аналогии с обработкой данных предыдущего испытания определим характеристики и параметры разгона и торможения транспортного средства при скорости движения 50 км/ч (Рисунок 61).

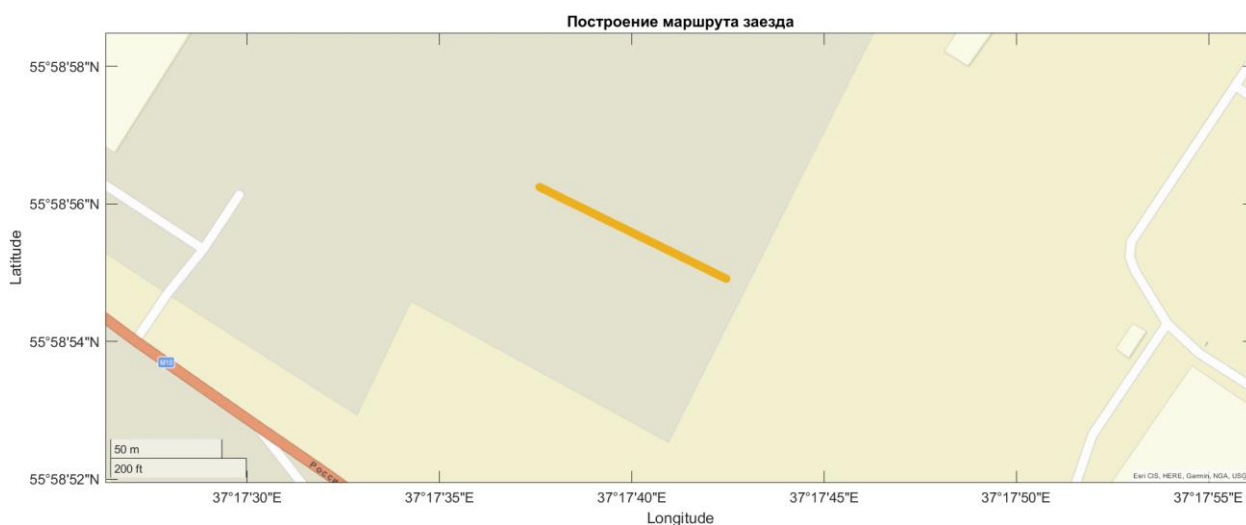


Рисунок 61. График траектории движения при скорости 50 км/ч

3.4.2.1.2 Построение графиков зависимостей параметров скорости движения транспортного средства, пройденного пути, % нажатия педалей газа и тормоза, числа оборотов коленчатого вала

На Рисунок 62Рисунок 104 показаны графики зависимости скорости ТС от пройденного пути.

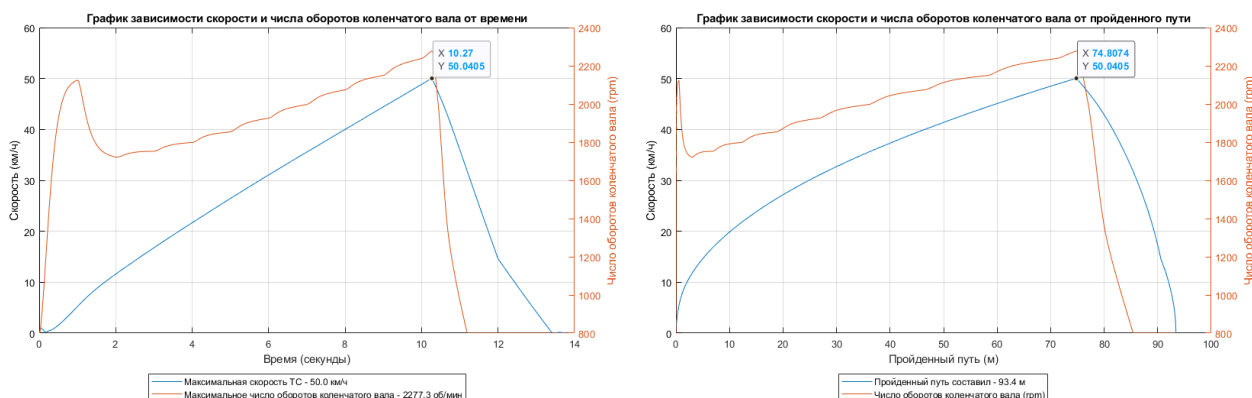


Рисунок 62. График зависимостей скорости движения от пройденного пути

Основываясь на данных графиков (Рисунок 62) делаем вывод, что разгон от 0 до 50 км/ч составил 10.27 секунд, соответственно, на 74.8074 метре пройденного пути.

Так как данное испытание является виртуальным и в роли объекта выступает цифровой двойник, то момент снижения скорости аналогичен моменту достижения скорости 50.0405 км/ч.

По данным Рисунок 62 видим, что транспортное средство начало снижение скорости на 10.27 секунде пути при скорости 50.0405 км/ч. Пройденный путь транспортного средства составил 74.8074 метр.

Данные о полной остановке транспортного средства показаны на Рисунок 63.

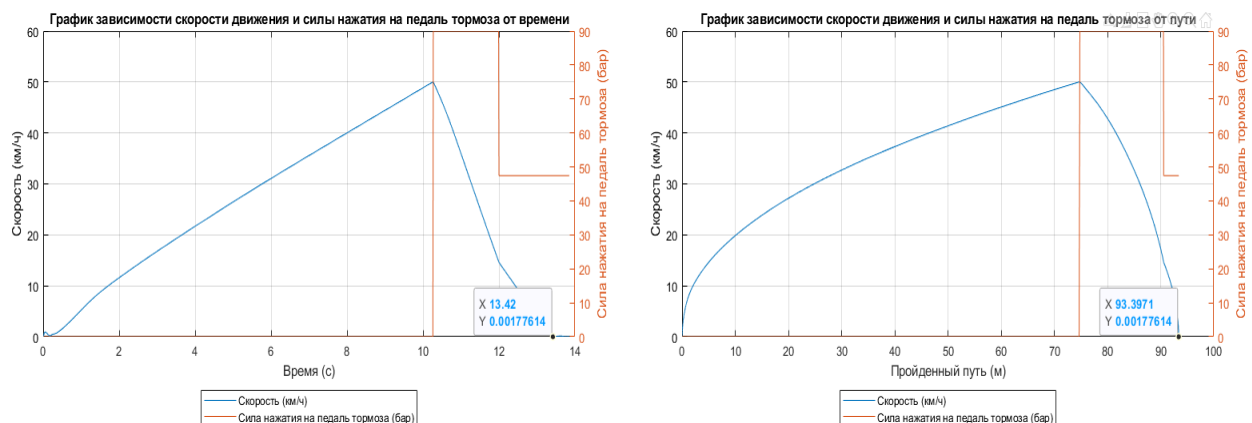


Рисунок 63. Момент полной остановки транспортного средства

Полная остановка автомобиля была зафиксирована на 13.42 секунде. Пройденный путь от начала движения транспортного средства до полной остановки составил 93.3971 метра.

Момент убирания ноги с педали газа и нажатие педали тормоза аналогичен данным при достижении скорости движения 50 км/ч.

3.4.2.1.3 Выводы по заезду «Разгон от 0 до 50 и торможение»

По общим результатам заезда «Разгон от 0 до 50 км/ч и торможение» определим следующие выводы:

1. Разгон от 0 до 50 км/ч составил 10.27 секунд (74.8074 м.);
2. Тормозной путь составил 18м. (18.5897 м.). Время торможения от 50.0405 км/ч составило 3.15 секунды.

3.4.2.2 Дорожный заезд №2 при достижении скорости транспортного средства 60 км/ч

3.4.2.2.1 Построение траектории движения

По аналогии с предыдущей обработкой экспериментальных данных определим траекторию движения транспортного средства при скорости движения 60 км/ч (Рисунок 64).



Рисунок 64. График траектории движения при скорости 60 км/ч

3.4.2.2.2 Построение графиков зависимостей параметров скорости движения транспортного средства, пройденного пути, % нажатия педалей газа и тормоза, числа оборотов коленчатого вала

На Рисунок 65 показаны графики зависимости скорости ТС от пройденного пути.

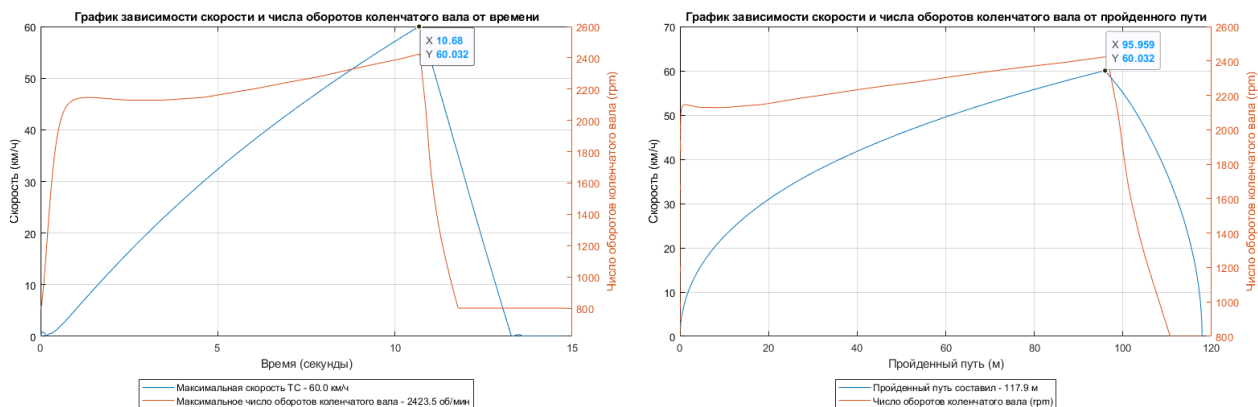


Рисунок 65. График зависимостей скорости движения от пройденного пути

Основываясь на данных графиков (Рисунок 65) делаем вывод, что разгон от 0 до 60 км/ч составил 10.68 секунд, соответственно, на 95.959 метре пройденного пути.

Момент снижения скорости транспортного средства указан на Рисунок 66.

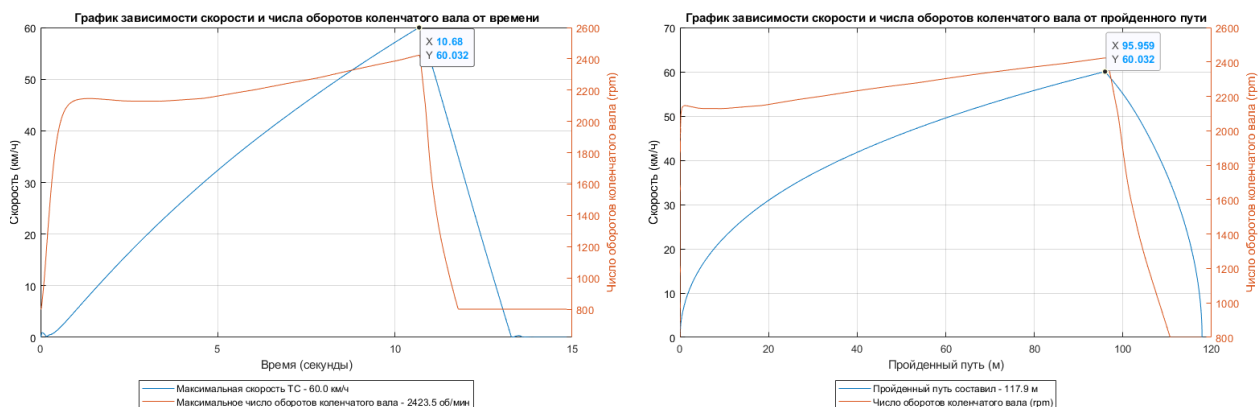


Рисунок 66. Момент снижения скорости транспортного средства

По данным Рисунок 66 видим, что транспортное средство начало снижение скорости на 10.68 секунде пути при скорости 60.032 км/ч. Пройденный путь транспортного средства составил 95.959 метр.

Данные о полной остановке транспортного средства показаны на Рисунок 67.

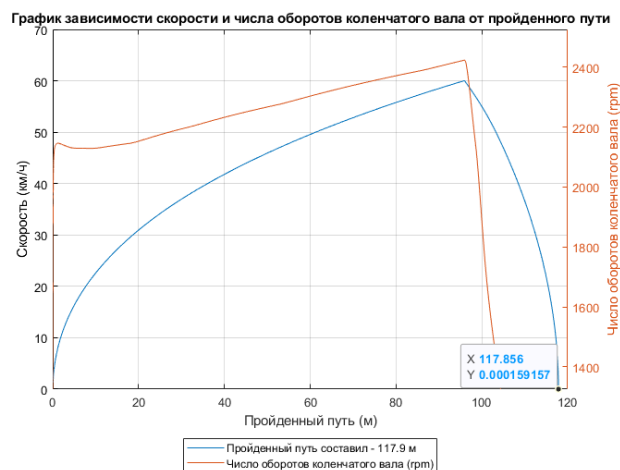
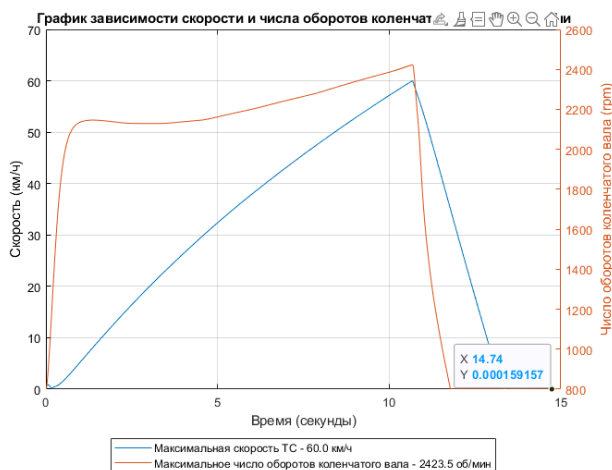


Рисунок 67. Момент полной остановки транспортного средства

Полная остановка автомобиля была зафиксирована на 14.74 секунде. Пройденный путь от начала движения транспортного средства до полной остановки составил 117.856 метров.

Определим момент убирания ноги с педали газа по графику зависимости скорости, пройденного пути от % нажатия педали газа (Рисунок 68).

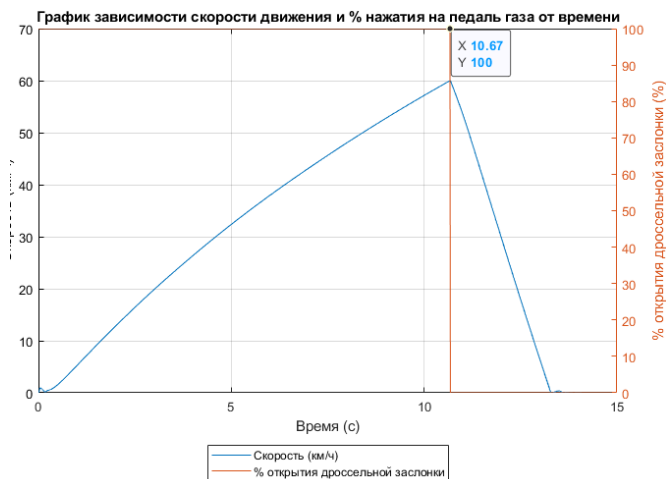


Рисунок 68. График зависимости скорости движения, пройденного пути от % нажатия педали

Цифровой двойник начал полное торможение на 10.67 секунде при скорости движения 60.032 км/ч, при пройденном пути 95.959 м.

На Рисунок 69 показаны графики, которые отражают зависимость параметра % нажатия педали тормоза от скорости движения транспортного средства и пройденного пути.

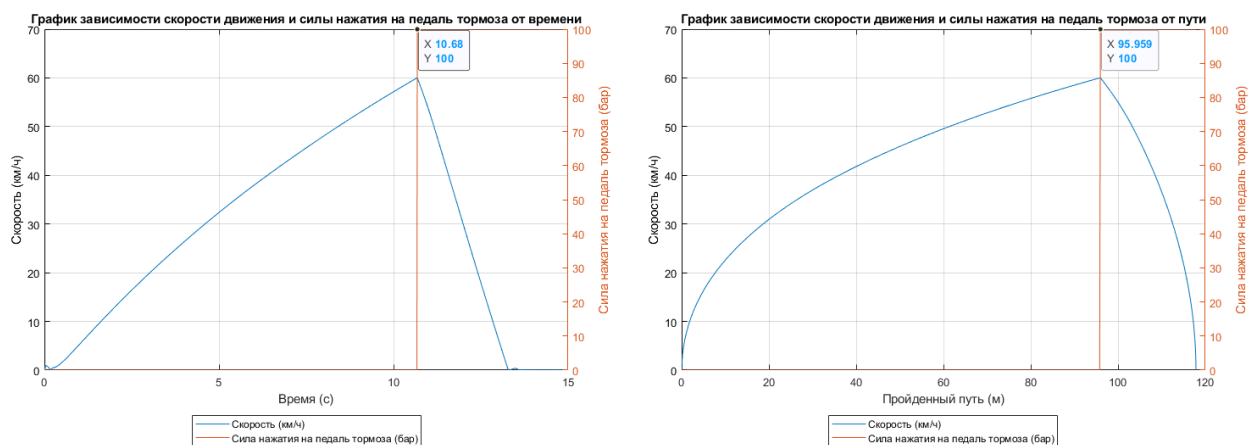


Рисунок 69. Момент нажатия педали тормоза

3.4.2.2.3 Выводы по заезду «Разгон от 0 до 60 и торможение»

По общим результатам заезда «Разгон от 0 до 60 км/ч и торможение» определим следующие выводы:

1. Разгон от 0 до 60 км/ч составил 10.68 секунд (95.959 м.);
2. Тормозной путь составил 26.306м. Время торможения от скорости движения транспортного средства 60.032 км/ч составило 4.06 секунды.

3.4.3 Испытание «Выруливание от препятствия»

3.4.3.1 Дорожный заезд при фиксированном угле рулевого колеса

3.4.3.1.1 Построение траектории движения

Построим траекторию движения транспортного средства для дорожного испытания «Выруливание от препятствия» (Рисунок 70).

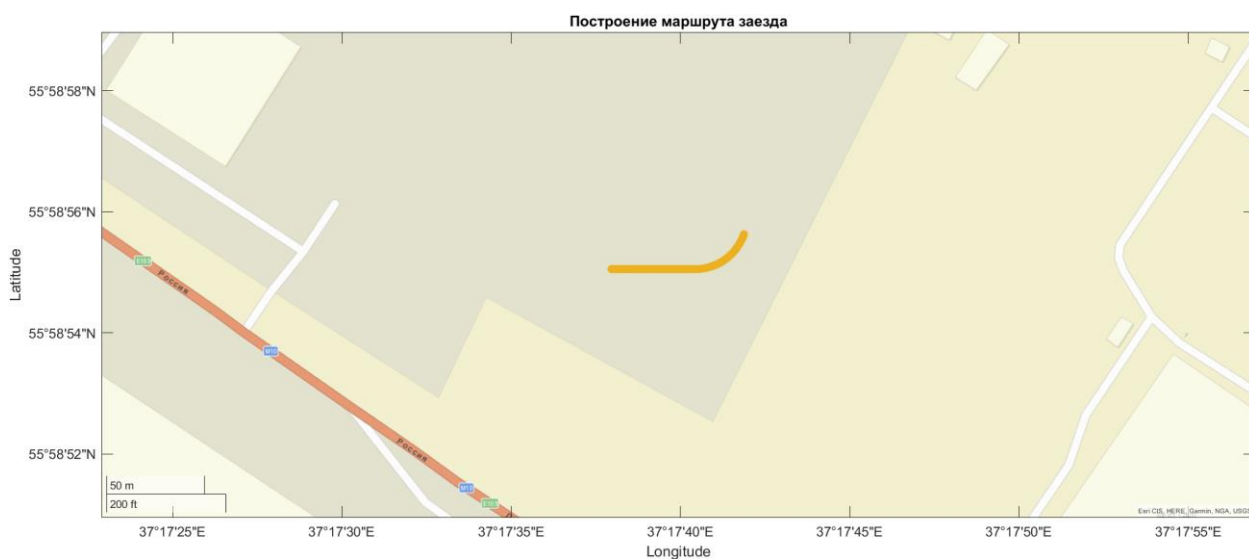


Рисунок 70. График траектории движения с последующим выруливанием от препятствия

3.4.3.1.2 Построение графиков зависимостей параметров скорости движения транспортного средства, пройденного пути, угла поворота рулевого колеса

Момент выруливания транспортного средства от препятствия при фиксированном угле поворота рулевого колеса представлен на Рисунок 71, Рисунок 72.

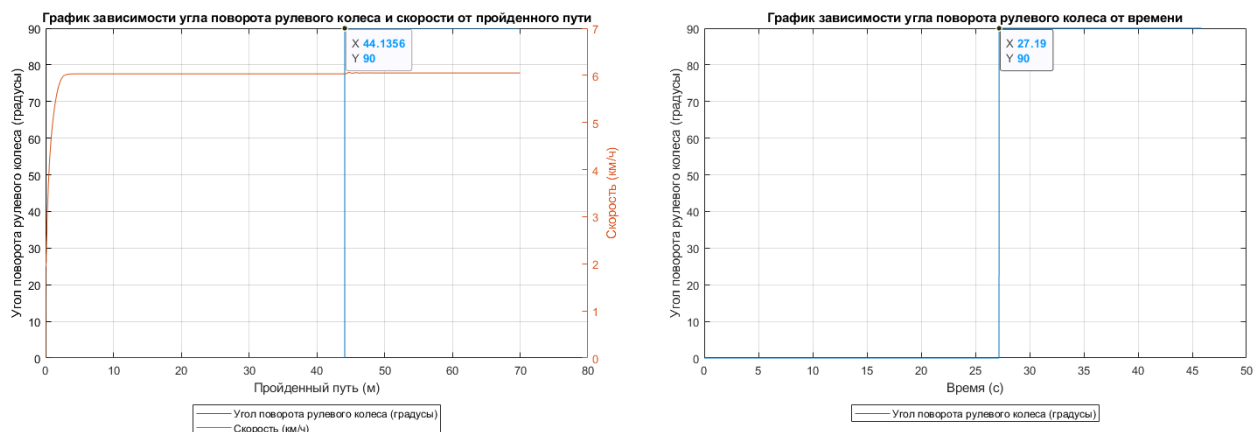


Рисунок 71. Графики зависимости угла поворота рулевого колеса и скорости от пройденного пути и времени

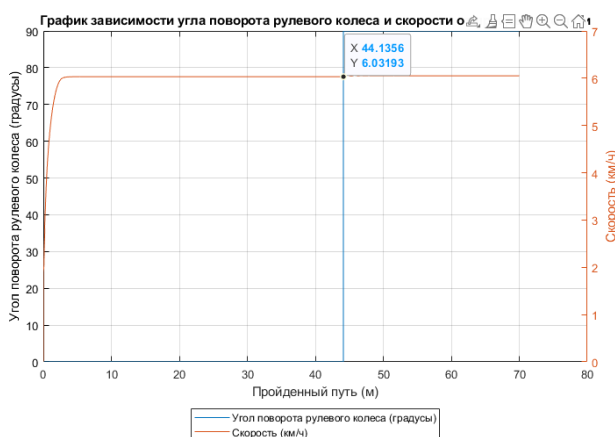


Рисунок 72. График зависимости угла поворота рулевого колеса и скорости от пройденного пути. Момент выруливания транспортного средства от препятствия По данным графика на Рисунок 72 видим, что момент выруливания транспортного средства происходил на 27.19 секунде, 44.1356 метре пути при скорости движения 6 км/ч. Момент выруливания транспортного средства от препятствия представлен на Рисунок 73.



Рисунок 73. Момент выруливания транспортного средства от препятствия в программной среде «Simcenter Prescan»

3.4.3.1.3 Построение графика данных лидара

По графику данных лидара также можно увидеть, что механизм автоматического выруливания транспортного средства от препятствия на 90 градусов в левую сторону движения успешно отработан (Рисунок 74).

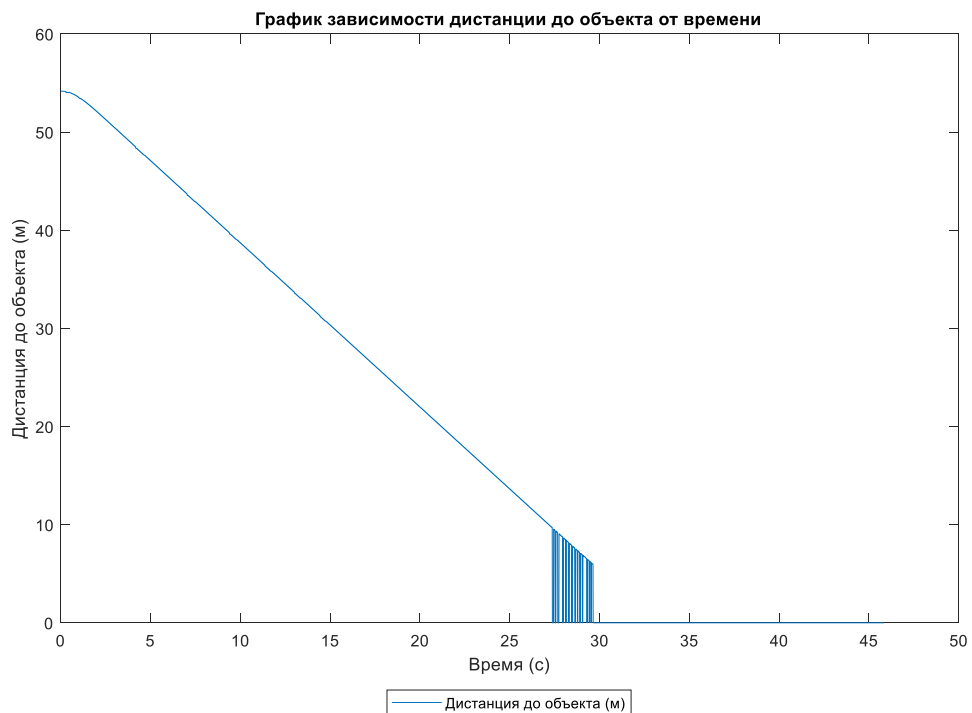


Рисунок 74. График данных лидара

Глава 4 ДОРОЖНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА «CHEVROLET ORLANDO»

4.1 Объект испытаний

В качестве объекта испытаний был использован легковой автомобиль категории М1 Chevrolet Orlando 1.8 LTZ 6АТ (КВФ6) 2012 года выпуска.

Габаритные размеры транспортного средства, технические и динамические характеристики приведены в Таблица 23 [34].

Таблица 23. Технические характеристики Chevrolet Orlando 1.8 LTZ 6АТ 2012

Наименование свойства	Значение
Двигатель	
Расположение двигателя	Спереди, поперечно, перед передней осью
Система охлаждения	Жидкостная, замкнутая
Количество цилиндров	4
Диаметр цилиндра, мм	80,5
Ход поршня, мм	88,2
Рабочий объем, куб. см	1796
Степень сжатия	10,5
Тип двигателя	4 цилиндра, рядный, спереди поперечно, 4 клапана на цилиндр
Материал блока цилиндров/головки блока	Чугун/алюминиевый сплав
Распределительные валы	2, в головке блока (DOHC)
Тип газораспределительного механизма	DOHC 16 клапанов
Число клапанов на цилиндр	4
Топливный насос	С электроприводом
Система контроля токсичности	Siemens SIM2K-76
Максимальная мощность, кВт/л.с. @ об/мин	104 / 141 @ 6200
Литровая мощность, кВт/л; л.с./л	57,8; 78,3
Максимальный крутящий момент, Нм / об/мин	176 / 3800
Удельный крутящий момент, Нм/л	97,8
Среднее эффективное давление при макс. крутящем моменте, бар	11,21
Макс. Мощности при макс. Крутящем моменте, кПа	1230,8
Средняя скорость поршня, м/с	18,2
Объем моторного масла в двигателе, л	4,5
Объем системы охлаждения, л	6,5
Мощность аккумуляторной батареи 12 В, А-ч	60
Мощность генератора 14,2 Вт	100А

Наименование свойства	Значение
Трансмиссия	
Тип привода	Передний
Тип коробки передач	Автоматическая
Передаточные отношения	3,818/2,158/1,481/1,121/0,886/0,60865/з.х. 3,545/ГП:4,176
Кузов	
Число мест	7
Коэффициент аэродинамического сопротивления Cx	0,325
Площадь в миделе кв. м	2,547
Произведение Cx на площадь в миделе	0,828
Подвеска	
Передняя	Независимая, МакФерсон
Задняя	Полузависимая с торсионной балкой
Тормозная система	
Тормозной контур	Диагональный
Передние тормозные диски	Вентилируемые, 300 мм
Задние тормозные диски	Невентилируемые, 292 мм
Тип АБС	4-канальная с 4 датчиками
Размеры и массы	
Наружные размеры	
Длина, мм	4652
Ширина, мм	1836
Высота, мм	1633
Колесная база, мм	2760
Колея передняя/задняя, мм	1584/1588
Размеры салона	
Длина, мм	2659
Ширина, мм	1450
Высота, мм	1246
Пространство для ног, спереди/сзади, мм	1034/917/735
Ширина на уровне плеч, спереди/сзади, мм	1450/1419/1307
Высота до потолка, спереди/сзади, мм	1020/983/945
Объем багажника – все сидения подняты, л.	89
Объем багажника - сложен третий ряд, по оконную линию/по линию крыши, л.	454/727
Объем багажника – сложены второй и третий ряд, по оконную линию/по линию крыши, л.	852/1487
Размерность колес / шин	6.5Jx16/215/60R16

Наименование свойства	Значение
	7Jx17/225/50R17 8Jx18/235/45R18
Диаметр разворота по колес передних колес/по наружному габариту, м	11,3/11,8
Число оборотов рулевого колеса от упора до упора	2,74
Рулевое управление	С электроусилителем
Наружный диаметр рулевого колеса, мм	370
Снаряженная масса/максимально допустимая масса, кг	1528/2160
Удельная мощность, кг/л.с.	14,69230769
Максимальная осевая нагрузка, спереди/сзади, кг	1220/1190
Допустимая масса прицепа – без тормозов, кг	750
Допустимая масса прицепа – с тормозами, кг	1100
Максимальная нагрузка на тягово-сцепное устройство (ТСУ), кг	75
Нагрузка на шаровую опору ТСУ, кг	25
Максимальная масса багажника с грузом на крыше, кг	100
Объем топливного бака, л	64
Динамические характеристики	
Максимальная скорость, км/ч	185
Разгон 0–100 км/ч, с	11,6
Ускорение 40–100 км/ч на 4-й передаче, с	17,5
Ускорение 80–120 км/ч на 5-й передаче, с	18,5
Ускорение 80–120 км/ч на 6-й передаче, с	Нет данных
Уровень шума, дБ	72,5
Тип топлива	Бензин
Средний расход топлива, л/100км	7,3
Расход топлива при городском цикле, л/100км	9,7
Расход топлива при загородном цикле, л/100км	5,9
Средние выбросы CO ₂ , г/км	172
Выбросы CO ₂ при городском цикле, г/км	229
Выбросы CO ₂ при загородном цикле, г/км	139
Соответствие экологическому стандарту	Евро-5

4.2 Измерительное и регистрирующее оборудование

Для записи динамических параметров движения АТС во время проведения испытаний на полигоне использовалось следующее измерительное и регистрирующее оборудование:

1. Датчик усилия нажатия на тормозную педаль CPFTA «KISTLER», Germany;



Рисунок 75. Датчик усилия нажатия на тормозную педаль

2. Универсальная измерительная система сбора и обработки данных CS 1016 FAMOS Online «IMC», Germany;



Рисунок 76. Измерительная система сбора и обработки данных

3. Динамометрическое измерительное рулевое колесо MEASUREMENT STEERING WHEEL (Далее – MSW) «KISTLER», Germany;



Рисунок 77. Измерительное рулевое колесо «MSW KISTLER»

4. Антенна GPS/GLONASS «JAVAD», USA (Рисунок 78, сноска 1);

5. Антенна GPS «GARMIN», USA (Рисунок 78, сноска 2);



Рисунок 78. Антенны GPS-позиционирования

6. Сканер лидар (LIDAR).



Рисунок 79. Сканирующее устройство лидар (LIDAR)

4.3 Регистрируемые показатели

Регистрируемые показатели состоят из:

1. Время выполнения испытаний;
2. Скорость автомобиля по данным спутниковой навигации GPS/GLONASS;
3. Ускорение автомобиля по данным GPS/GLONASS;
4. Путь, пройденный автомобилем, по данным GPS/GLONASS;
5. Географическая широта по данным GPS/GLONASS;
6. Географическая долгота по данным GPS/GLONASS;
7. Географическая эллиптическая высота по данным GPS/GLONASS;
8. Географический угол направления движения по данным GPS/GLONASS;
9. Количество спутников GPS/GLONASS, используемых для определения координат автомобиля в каждый момент времени;
10. Частота вращения коленчатого вала по данным ЭБУ ДВС;
11. Положение дроссельной заслонки по данным ЭБУ ДВС;
12. Положение педали сцепления по данным ЭБУ ДВС;
13. Положение педали тормоза по данным ЭБУ ДВС;

14. Напряжение датчика положения педали «газа» по данным ЭБУ ДВС;

15. Скорость автомобиля по данным ЭБУ ДВС.

4.4 Программа испытаний

Испытательные заезды проводились на автополигоне МАДИ (Рисунок 80), расположенном по адресу: Московская область, Солнечногорский район, 34-й км. Ленинградского шоссе, д. Елино, полигон МАДИ:



Рисунок 80. Испытательный участок. Автополигон «МАДИ»

Дорожные испытания проводятся на сухом, ровном асфальтобетонном покрытии.

Проводимые испытания:

1. Максимально динамический заезд по криволинейной траектории «Змейка» при различных скоростях транспортного средства. Перед началом данного заезда была произведена запись с целью фиксации точных географических координат всех конусов;
2. Заезд, предполагающий разгон транспортного средства с точки старта с последующим торможением при различных скоростях движения;

3. Заезд, предполагающий круговое движение транспортного средства влево при повороте руля в 90 градусов при различных значениях скорости;

4. Заезд, предполагающий выруливание от препятствия, в случае приближения транспортного средства к препятствию менее чем на 10 метров.

4.4.1 Испытание «Змейка»

Дорожное испытание «Змейка» включает в себя испытание при различных значениях скорости:

1. 10 км/ч;
2. 15 км/ч;
3. 20 км/ч;
4. 40 км/ч.

Перед началом испытания «Змейка» была произведена фиксация всех конусов для максимальной точности географических координат (Рисунок 81).



Рисунок 81. Фиксация препятствий для максимальной точности географических координат

На Рисунок 82 представлена разметка дорожного испытания «Змейка».

Целью дорожного испытания является объезд ряда препятствий по траектории, напоминающей движение змеи, не выезжая за разметку испытания. Препятствиями являются конусы в количестве 7 штук. Расстояние препятствий друг от друга составляет – 7 м. Общее расстояние разметки испытания «Змейка» - 42м.



Рисунок 82. Разметка испытания «Змейка»

4.4.2 Испытание «Разгон и торможение»

Целью дорожного испытания «Разгон и торможение» является вариация прямолинейного движения транспортного средства и последующее торможение при достижении различных скоростей:

3. Разгон от 0 до 50 и последующее торможение (Рисунок 83, сноска 1);
4. Разгон от 0 до 60 и последующее торможение (Рисунок 83, сноска 2).

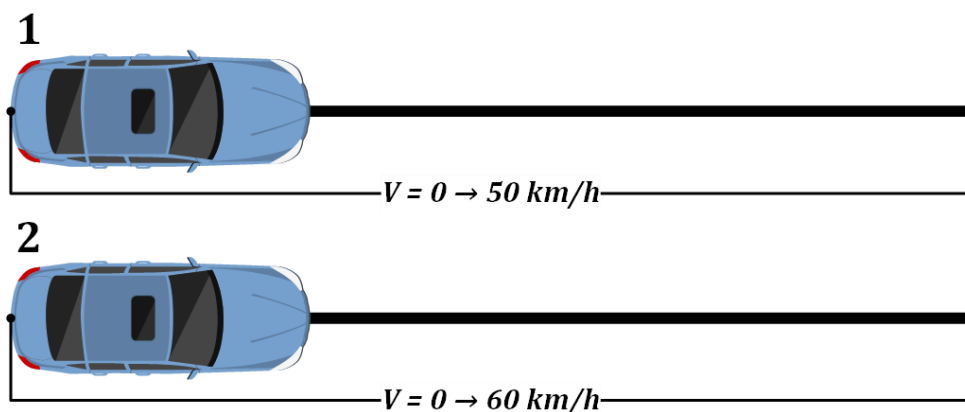


Рисунок 83. Разметка испытания «Разгон и торможение» при различных скоростях движения транспортного средства

4.4.3 Испытание «Выруливание от препятствия»

Целью данного испытания является предотвращение наезда на препятствие. В роли препятствия выступает конус. В случае если расстояние от движущегося объекта до препятствия будет составлять менее чем 10 метров, АТС предпримет выруливание рулевого колеса от препятствия на 90 градусов в левую сторону движения (Рисунок 84).

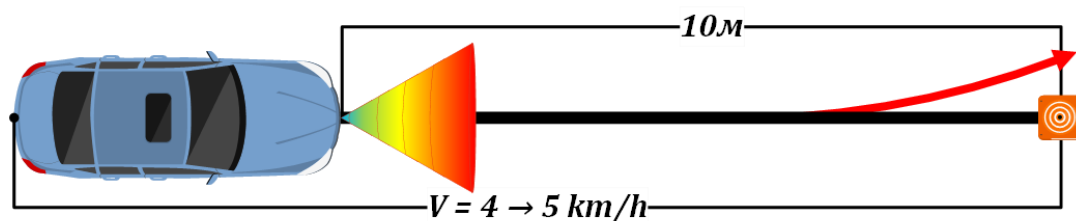


Рисунок 84. Разметка испытания «Выруливание от препятствия»

Для выкруливания транспортного средства от препятствия была создана математическая модель, состоящая из различных блоков программного продукта «MATLAB&Simulink» (Рисунок 85).

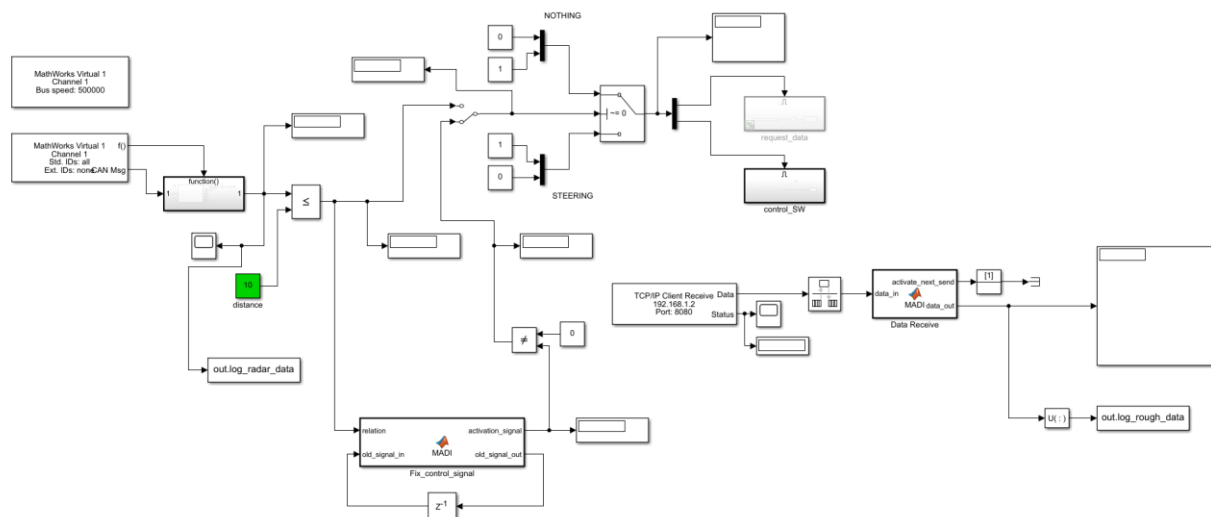


Рисунок 85. Математическая модель взаимодействия программной среды «MATLAB&Simulink» и транспортного средства в режиме реального времени

Блок «MathWorks Virtual 1» позволяет получить данные из ЭБУ по разъему CAN. Данный блок подключен к блоку функции, которая разворачивает данные, находящиеся в системе ЭБУ. Выходным параметром функции являются данные лидара, а именно расстояние до объектов в разрезе 100 метров.

Алгоритм выкруливания от препятствия устроен таким образом, что при достижении диапазона препятствия ≤ 10 метров, активируется блок «control_SW».

Блок «control_SW» позволяет передавать через протокол связи TCP/IP значения в ЭБУ.

В нашем случае передаем конвертированное значение поворота рулевого колеса в шестнадцатеричной системе счисления предварительно конвертируя нужное значение.

Например, необходимо повернуть рулевое колесо на 180 градусов:

1. Конвертируем десятичное значение в шестнадцатеричную систему через команду `dec2hex(int16(90*16), 4);`

2. Получаем значение в шестнадцатеричной системе;

```
>> dec2hex(int16(180*16), 4)

ans =

    '0B40'
```

Рисунок 86. Конвертация значения из десятичной в шестнадцатеричную систему счисления

3. Значение «0B40» передаем в блок параметров «rotate_SW_and_get_data»;

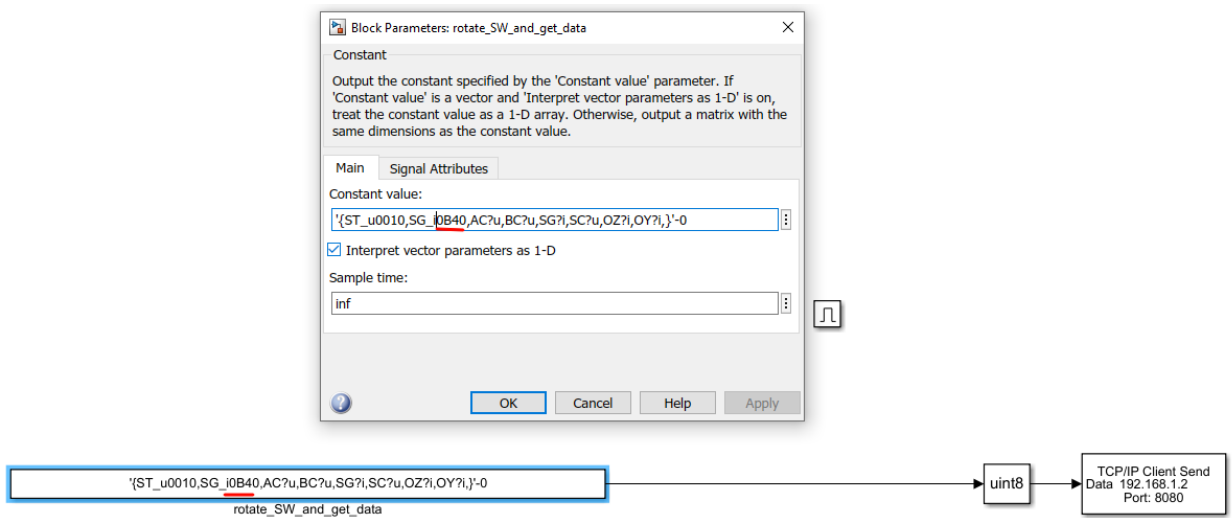


Рисунок 87. Передача значения в блок параметров «rotate_SW_and_get_data»

4. После передачи значения необходимо запустить симуляцию проекта в «MATLAB&Simulink» и при достижении препятствия менее чем за 10 метров автомобиль произведет поворот рулевого колеса в левую сторону движения на 180 градусов.

4.5 Протокол полигонных испытаний

Общее количество проведенных испытаний – 24. Этапы дорожных испытаний и промежуточные результаты фиксировались в протоколе полигонных испытаний, представленном в Таблица 24.

Таблица 24. Протокол полигонных испытаний Chevrolet Orlando 1.8 6AT 2012

Первый день (13.05.2021)					
№	Время	Тип испытания	Скорость	Имя файла	Комментарий

1	15:18:50	-	-	2001-09-27 15-18-50 (1)	Настройка оборудования позиционирования. На месте
2	15:19:27	-	-	2001-09-27 15-19-27 (2)	
3	15:20:15	Фиксация конуса	0	2001-09-27 15-20-15 (3)	Конус №2
4	15:21:16	Фиксация конуса	0	2001-09-27 15-21-16 (4)	Конус №3
5	15:21:53	Фиксация конуса	0	2001-09-27 15-21-53 (5)	Конус №4
6	15:22:30	Фиксация конуса	0	2001-09-27 15-22-30 (6)	Конус №5
7	15:23:15	Фиксация конуса	0	2001-09-27 15-23-15 (7)	Конус №6
8	15:24:03	Фиксация конуса	0	2001-09-27 15-24-03 (8)	Конус №7
9	15:25:35	Фиксация конуса	0	2001-09-27 15-25-35 (9)	Конус №1
10	15:28:49	Змейка	10	2001-09-27 15-28-49 (10)	
11	15:30:27	Змейка	15	2001-09-27 15-30-27 (11)	
12	15:33:31	Змейка	20	2001-09-27 15-33-31 (12)	
13	15:34:41	Змейка	30 (~40)	2001-09-27 15-34-41 (13)	
14	15:35:52	Змейка	40	2001-09-27 15-35-52 (14)	
15	15:38:51	Разгон и торможение	0 → 50	2001-09-27 15-38-51 (15)	
16	15:39:56	Разгон и торможение	0 → 60	2001-09-27 15-39-56 (16)	
Второй день (14.05.2021)					
№	Время	Тип испытания	Скорость	Имя файла	Комментарий

17	10:59:37	-	-	2001-09-28 10-59-37 (1)	Настройка оборудования позиционирования. На месте
18	11:01:00	-	-	2001-09-28 11-01-00 (2)	
19	11:03:30	Выруливание от цели	5	2001-09-28 11-03-30 (3)	
20	11:09:28	Выруливание от цели	4,5	2001-09-28 11-09-28 (4)	
21	11:11:43	Выруливание от цели	5	2001-09-28 11-11-43 (5)	
22	11:13:16	-	-	2001-09-28 11-13-16 (6)	Настройка оборудования позиционирования
23	11:15:42	Круговое движение	10 / 20 / ~ 30 - 35	2001-09-28 11-15-42 (7)	Данный заезд был записан при различных значениях скорости. Изменение скорости происходило в момент движения транспортного средства
24	11:18:32	-	-	2001-09-28 11-18-32 (8)	Настройка оборудования позиционирования. На месте

4.6 Обработка экспериментальных данных

Для записи и обработки экспериментальных данных дорожных заездов использовались следующие программные продукты:

1. imc Online FAMOS;
2. imc FAMOS;
3. Garmin BaseCamp.

4.6.1 Испытание «Змейка»

Для определения географического местоположения использовался навигационный приемник GPS/GLONASS с частотой измерения 100 Гц. Запись данных осуществлялась в программном продукте «imc Online FAMOS».

4.6.1.1 Определение местоположения конусов для испытания «Змейка».

Для определения местоположения конусов на карте необходимо построить график по осям координат – Y, X, Y, X для соответствующих данных – Lat, Long в программном продукте «imc FAMOS» (Рисунок 88).

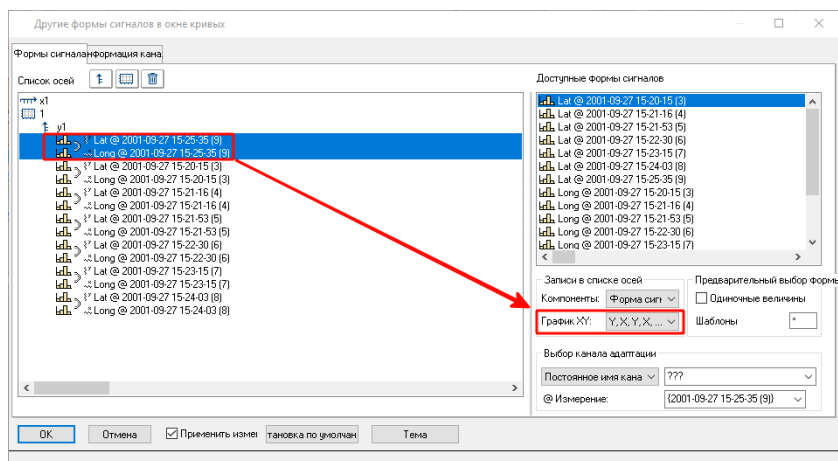


Рисунок 88. Окно «Кривых». Указание форм сигналов
После сопоставления данных с осями координат, необходимые объекты
появятся в главном окне графика:

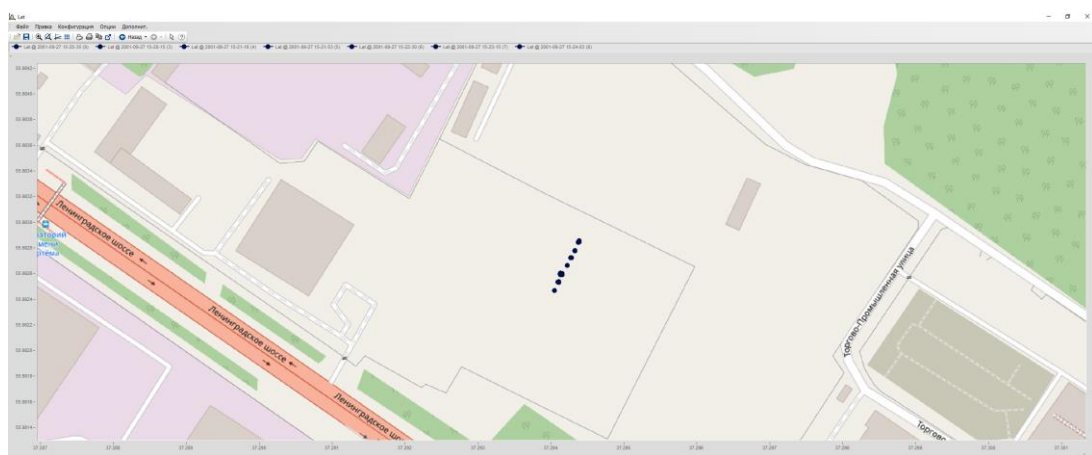


Рисунок 89. Отражение форм сигналов местоположения конусов на карте

Перед тем как проводить обработку экспериментальных данных, необходимо учесть, что отрицательному значения параметра α соответствует выруливание рулевого колеса транспортного средства в правую сторону.

4.6.1.2 Дорожный заезд №1 при скорости движения транспортного средства 10 км/ч

4.6.1.2.1 Построение траектории движения

В соответствии с полученными при записи данными на Рисунок 90 определена траектория движения транспортного средства на основании данных координат широты и долготы:

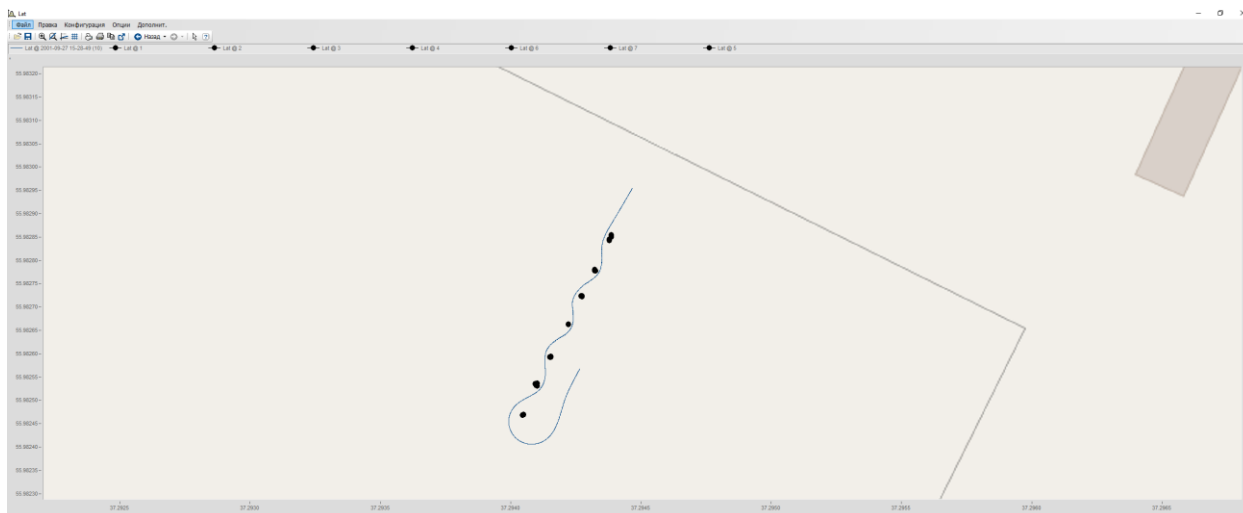


Рисунок 90. График траектории движения при скорости 10 км/ч

4.6.1.2.2 Построение графика зависимости скорости по GPS, пройденному пути по GPS и углу поворота рулевого колеса

Для построения графика по данным скорости GPS, пройденному пути GPS и углу поворота рулевого колеса используем соответствующий набор записей из программного продукта «iMS Online FAMOS». График зависимостей трех параметров, сформированных в программной среде «iMS FAMOS», представлен на Рисунок 91.

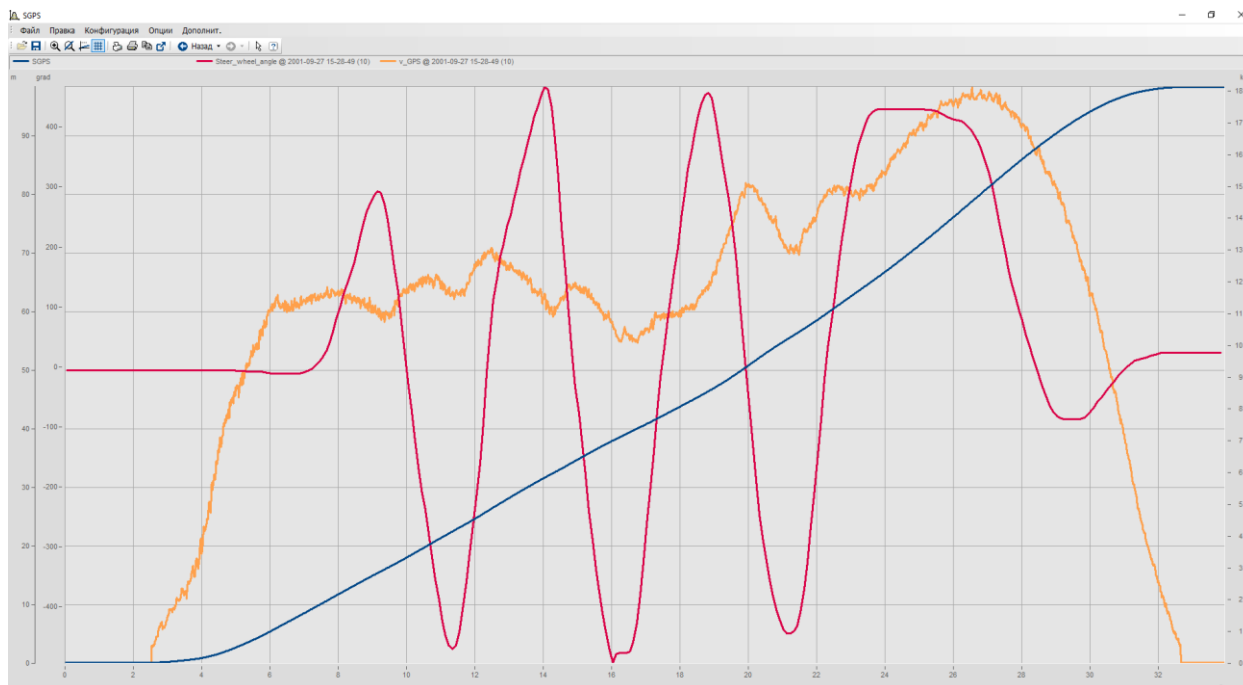


Рисунок 91. График зависимостей скорости движения, пройденного пути и угла поворота рулевого колеса от времени заезда

На основании данных графика зависимостей трех параметров, сформируем результаты, достигнутые при выруливании транспортного средства от препятствий в виде Таблица 25.

Таблица 25. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» от времени

№ препятствия	Параметры			
	t	V	S	α
1→2	9.18	10.941	15.425	292
2→3	11.35	11.7	22.449	-471
3→4	14.05	11.6	31.643	467.62
4→5	16.04	10.59	37.975	-494
5→6	18.82	11.804	46.325	457.7
6→7	21.23	13.1	55.582	-446

В Таблица 25 отражены значения, которые были получены при достижении максимального угла поворота руля в каждую сторону движения.

Иными словами, зафиксирован момент выруливания рулевого колеса от препятствия.

Максимальная скорость при проведении испытания составила 13.1 км/ч на 55.585 метре пройденного пути. Максимальный угол поворота руля в правую сторону движения составил 494 градуса, в левую 467.62.

4.6.1.3 Дорожный заезд №2 при скорости движения транспортного средства 15 км/ч

4.6.1.3.1 Построение траектории движения

Для заезда при скорости 15 км/ч формируем аналогичный результат данных, который был отражен в разделе 4.6.1.2.

Определим траекторию движения транспортного средства для заезда «Змейка» при скорости транспортного средства 15 км/ч (Рисунок 92).

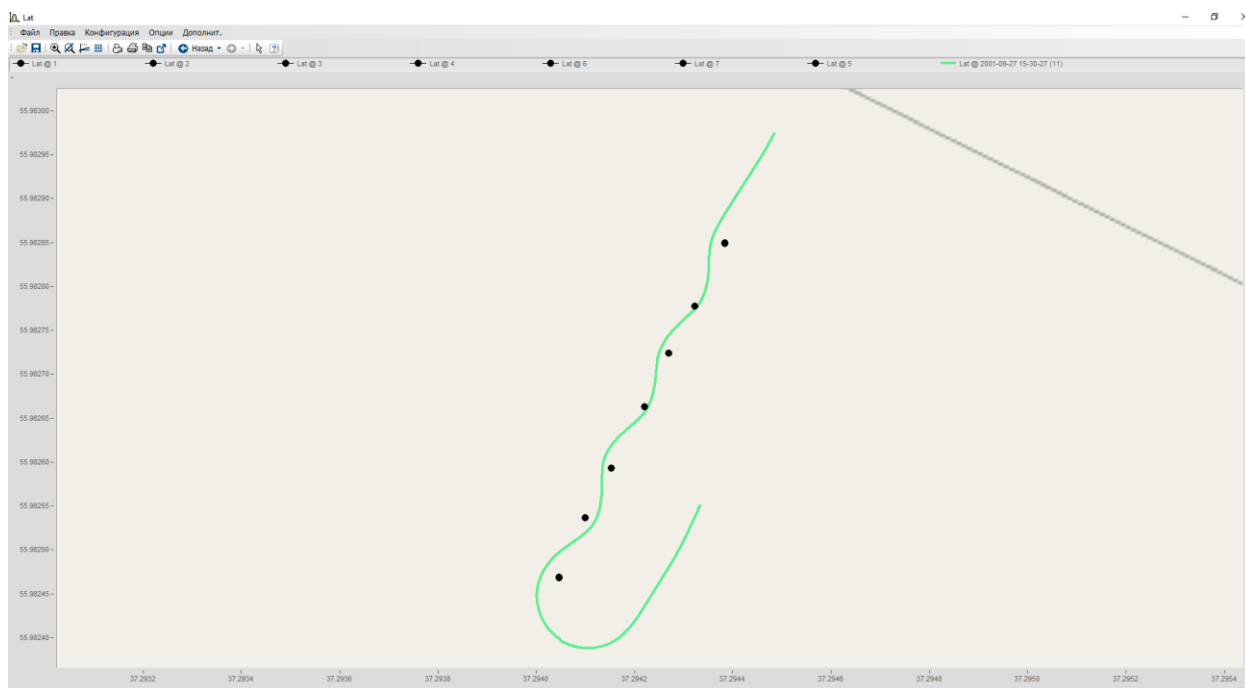


Рисунок 92. График траектории движения при скорости 15 км/ч

4.6.1.3.2 Построение графика зависимости скорости по GPS, пройденному пути по GPS и углу поворота рулевого колеса

График зависимостей параметров «Скорость по GPS», «Пройденное расстояние по GPS», «Угол поворота рулевого колеса», сформированных в программной среде «iмс FAMOS», представлен на Рисунок 93.

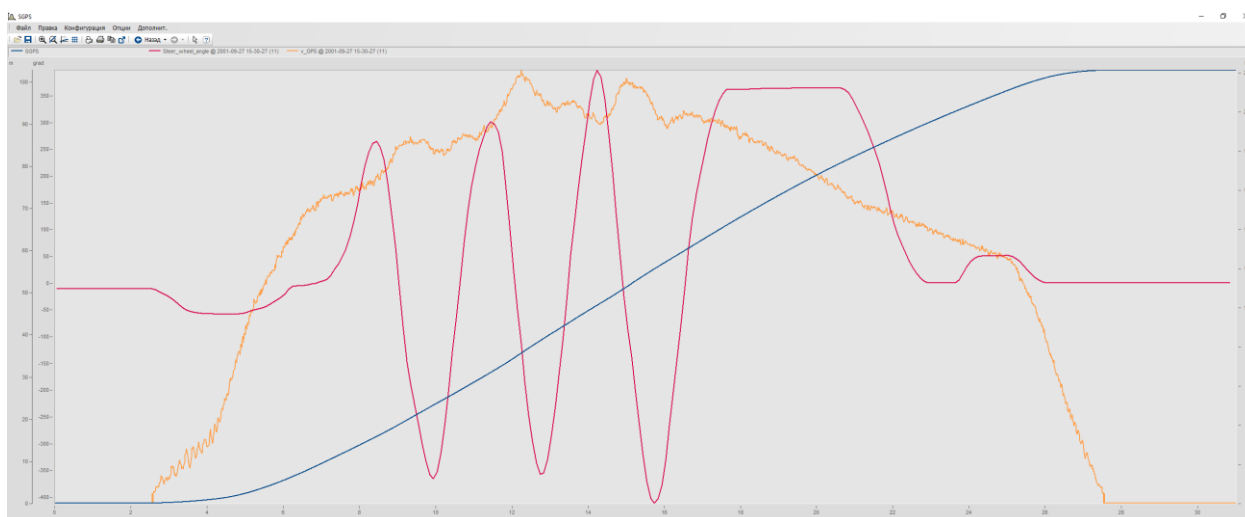


Рисунок 93. График зависимостей скорости движения, пройденного пути и угла поворота рулевого колеса от времени заезда

На основании данных графика зависимостей параметров сформируем результаты, достигнутые при выруливании транспортного средства от препятствий в виде Таблица 26.

Таблица 26. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» от времени

№ препятствия	Параметры			
	t	V	S	α
0→1	4.4	4.82	1.190	-57.69
1→2	8.42	16.631	15.74	265.114
2→3	9.95	17.875	23.355	-365
3→4	11.45	19.356	31.085	301.663
4→5	12.774	20.919	38.615	-357.911
5→6	14.24	19.548	47.050	398.622
6→7	15.75	20.109	55.753	-410.854

На таблица отражены значения параметров, которые были получены при достижении максимального угла поворота руля в каждую сторону движения.

Основываясь на данных заезда, можно сделать вывод, что ввиду небольшого расстояния между конусами (~ 7м) водитель непроизвольно увеличил скорость транспортного средства, что повлекло за собой наезд на препятствия 2, 4, 6 (Рисунок 94).



Рисунок 94. Наезд на препятствие

4.6.1.4 Дорожный заезд №3 при скорости движения транспортного средства 20 км/ч

По причине наезда транспортного средства на препятствия и маленького расстояния между конусами, было принято решение убрать конусы № 2, 4, 6.

Текущее расстояние между конусами составило 14м. Разметка испытания представлена на Рисунок 95.

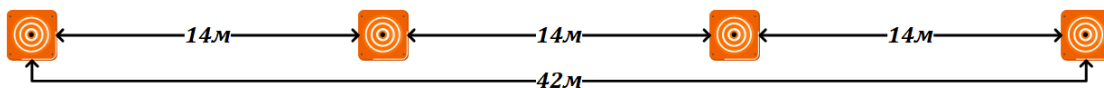


Рисунок 95. Разметка испытания «Змейка»

Фотография испытания с новой разметкой представлена на Рисунок 96.



Рисунок 96. Испытание с новой разметкой

4.6.1.4.1 Построение траектории движения

Определим траекторию движения транспортного средства для заезда «Змейка» при скорости транспортного средства 20 км/ч (Рисунок 97).

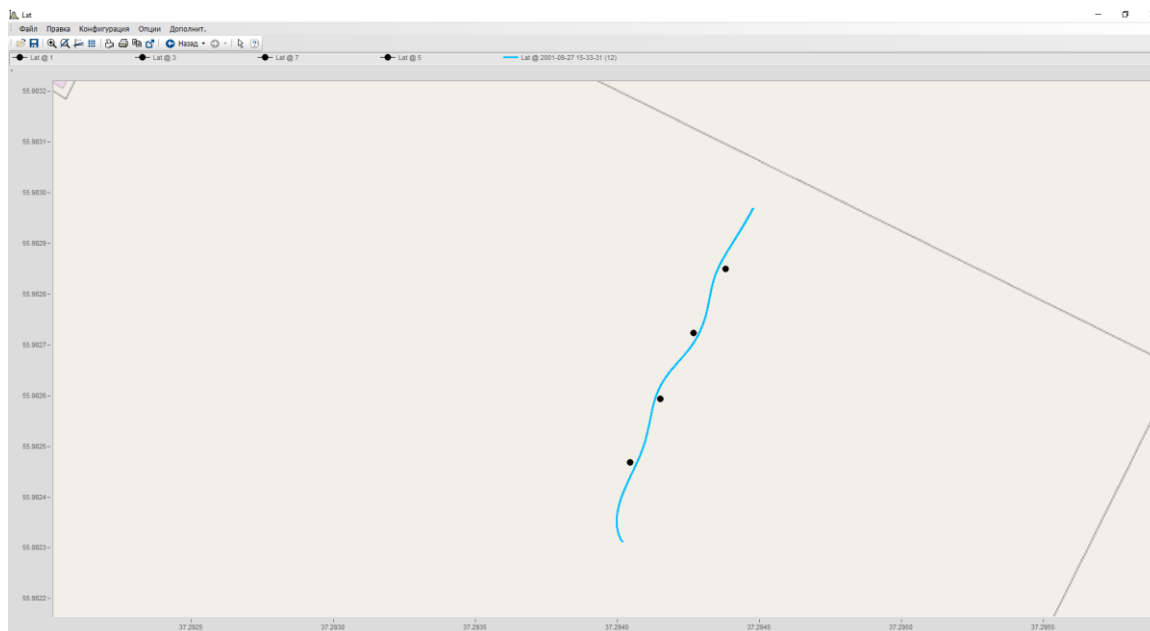


Рисунок 97. График траектории движения при скорости 20 км/ч

4.6.1.4.2 Построение графика зависимости скорости по GPS, пройденному пути по GPS и углу поворота рулевого колеса

График зависимостей параметров «Скорость по GPS», «Пройденное расстояние по GPS», «Угол поворота рулевого колеса», сформированных в программной среде «імс FAMOS», представлен на Рисунок 98.

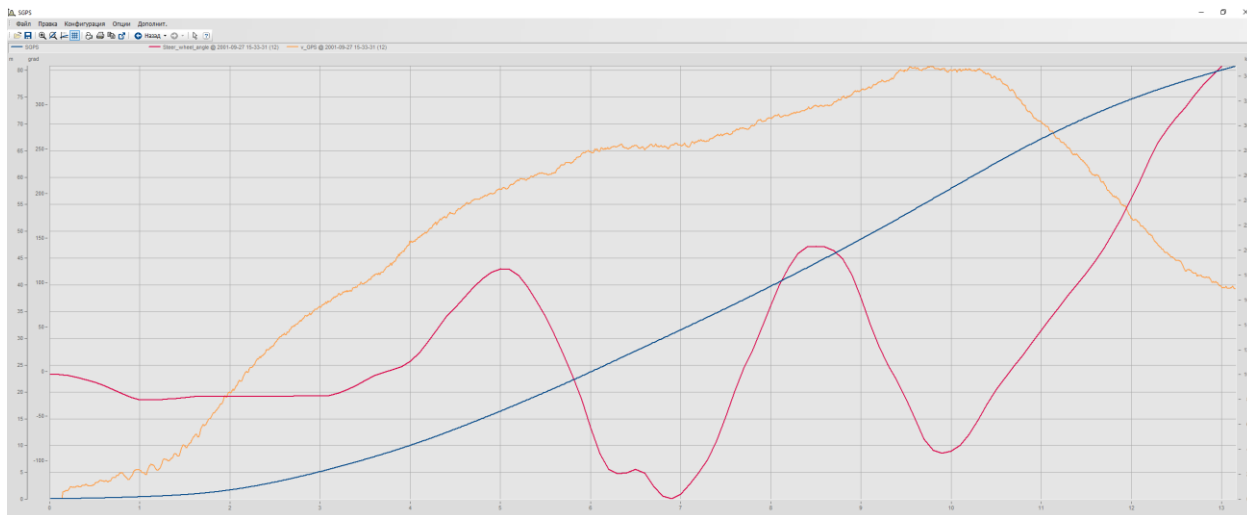


Рисунок 98. График зависимостей скорости движения, пройденного пути и угла поворота рулевого колеса от времени заезда

На основании данных графика зависимостей параметров сформируем результаты, достигнутые при выруливании транспортного средства от препятствий в виде Таблица 27.

Таблица 27. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» от времени

№ препятствия	Параметры			
	t	V	S	α
0→1	5	25.031	16.551	115.024
1→2	6.88	28.386	30.659	-142.846
2→3	8.49	31.642	43.986	140.566
3→4	9.91	34.601	57.161	-91.905

На Таблица 27 отражены значения параметров, которые были получены при достижении максимального угла поворота руля в каждую сторону движения.

Максимальная скорость при проведении испытания составила 34.6 км/ч на 57.161 метре пройденного пути. Максимальный угол поворота руля в правую сторону движения составил 142.846 градусов, в левую 140.566.

По сравнению с предыдущими заездами большое расстояние между препятствиями позволяет заранее предпринимать действия по выруливанию транспортного средства и предотвратить наезд при умеренной скорости движения.

4.6.1.5 Дорожный заезд №4 при скорости движения транспортного средства 30 км/ч

4.6.1.5.1 Построение траектории движения

Определим траекторию движения транспортного средства для заезда «Змейка» при скорости транспортного средства 30 км/ч (Рисунок 99).

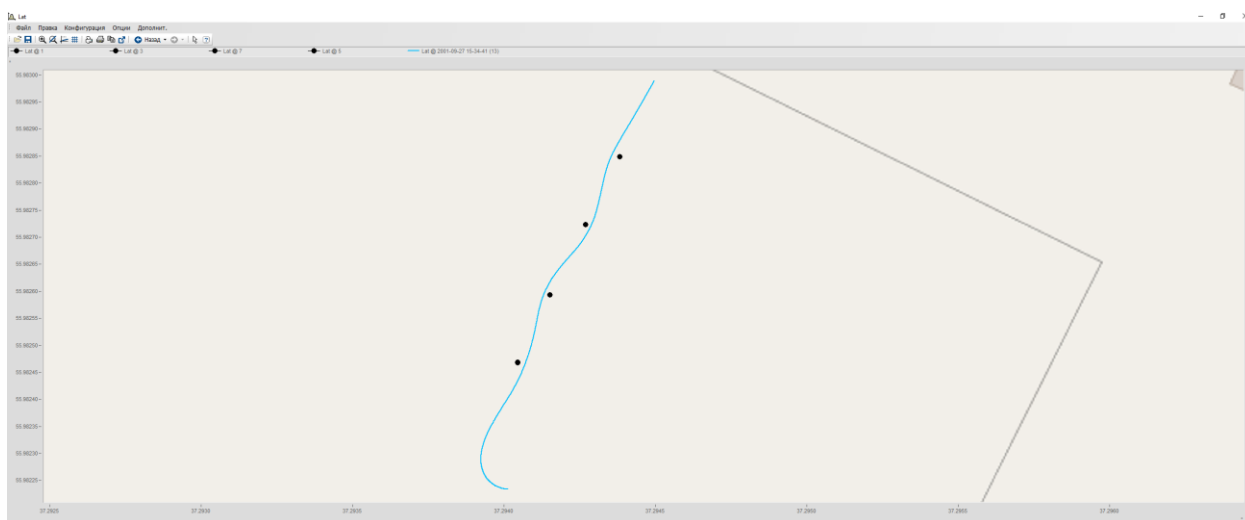


Рисунок 99. График траектории движения при скорости 30 км/ч

4.6.1.5.2 Построение графика зависимости скорости по GPS, пройденному пути по GPS и углу поворота рулевого колеса

График зависимостей параметров «Скорость по GPS», «Пройденное расстояние по GPS», «Угол поворота рулевого колеса», сформированных в программной среде «imc FAMOS», представлен на Рисунок 100.

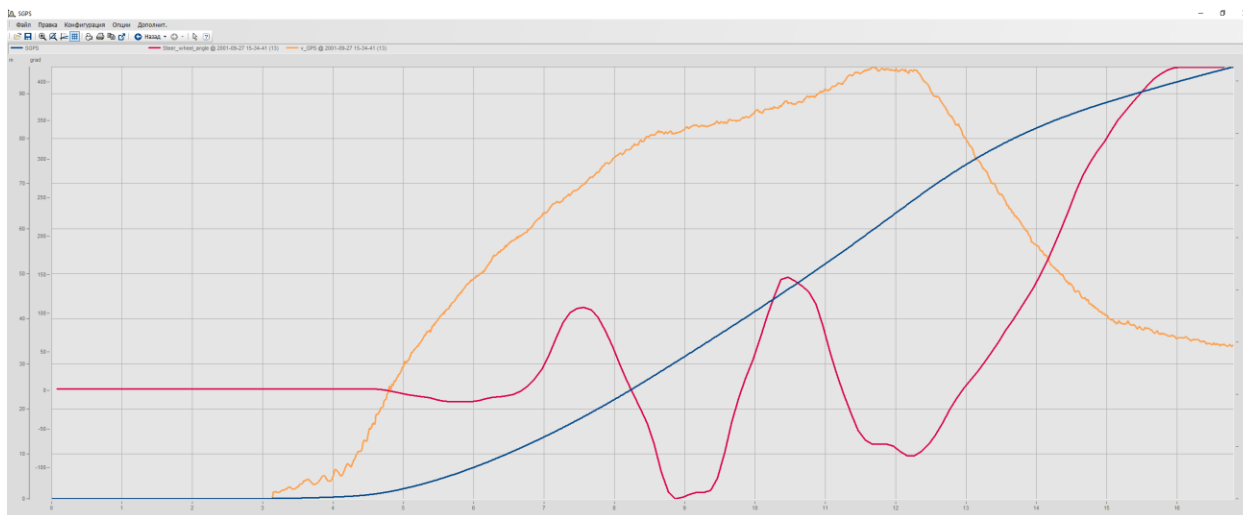


Рисунок 100. График зависимостей скорости движения, пройденного пути и угла поворота рулевого колеса от времени заезда

На основании данных графика зависимостей параметров сформируем результаты, достигнутые при выруливании транспортного средства от препятствий в виде Таблица 28.

Таблица 28. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» от времени

№ препятствия	Параметры			
	t	V	S	α
0→1	5.91	20.592	6.421	-14.750
1→2	7.53	29.966	17.930	107.298
2→3	8.88	35.090	30.419	-170.883
3→4	10.47	37.947	46.474	147.181

На Таблица 28 отражены значения параметров, которые были получены при достижении максимального угла поворота руля в каждую сторону движения.

Максимальная скорость при проведении испытания составила 37.947 км/ч на 46.474 метре пройденного пути. Максимальный угол поворота руля в правую сторону движения составил 170.883 градуса, в левую 147.181.

4.6.1.6 Дорожный заезд №5 при скорости движения транспортного средства 40 км/ч

4.6.1.6.1 Построение траектории движения

Определим траекторию движения транспортного средства для заезда «Змейка» при скорости транспортного средства 40 км/ч (Рисунок 101).

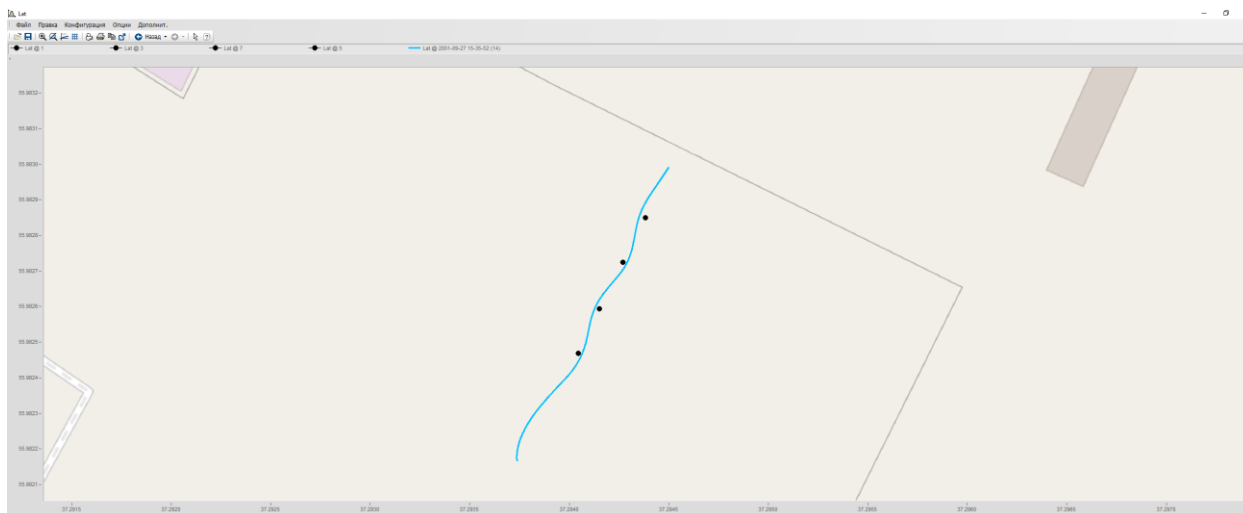


Рисунок 101. График траектории движения при скорости 40 км/ч

4.6.1.6.2 Построение графика зависимости скорости по GPS, пройденному пути по GPS и углу поворота рулевого колеса

График зависимостей параметров «Скорость по GPS», «Пройденное расстояние по GPS», «Угол поворота рулевого колеса», сформированных в программной среде «iмс FAMOS», представлен на Рисунок 102.

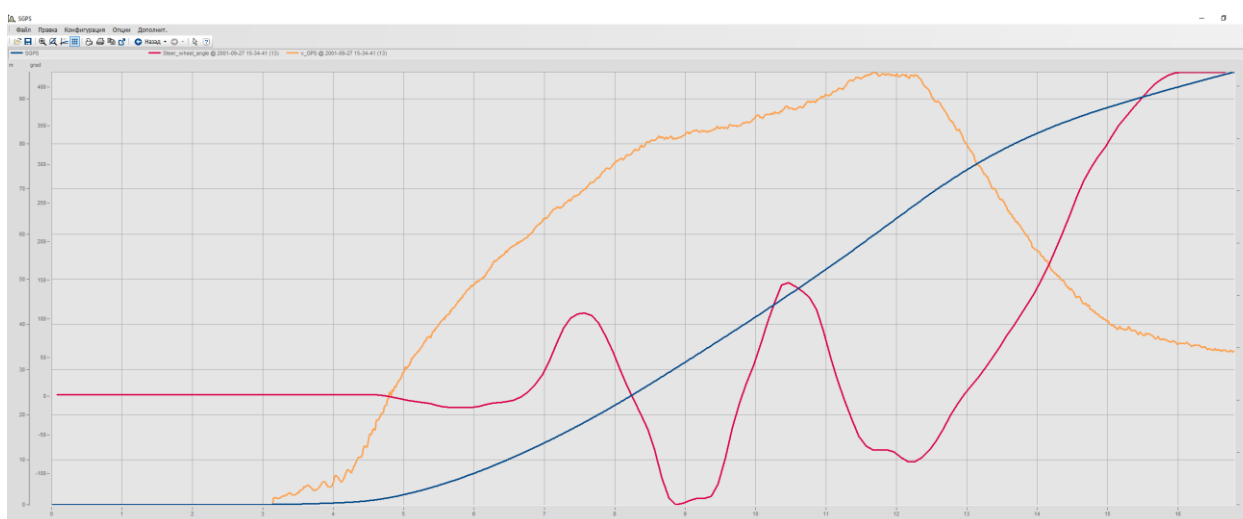


Рисунок 102. График зависимостей скорости движения, пройденного пути и угла поворота рулевого колеса от времени заезда

На основании данных графика зависимостей параметров сформируем результаты, достигнутые при выруливании транспортного средства от препятствий в виде Таблица 29.

Таблица 29. Таблица зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» от времени

№ препятствия	Параметры			
	t	V	S	α

0→1	6.69	14.861	2.899	-11.948
1→2	8.69	30.019	15.706	107.349
2→3	10.36	35.688	31.275	-146.438
3→4	12.00	37.788	47.831	127.854

На Таблица 29 отражены значения параметров, которые были получены при достижении максимального угла поворота руля в каждую сторону движения.

Максимальная скорость при проведении испытания составила 37.788 км/ч на 47.831 метре пройденного пути. Максимальный угол поворота руля в правую сторону движения составил 146.438 градусов, в левую 127.854.

4.6.2 Испытание «Разгон и торможение»

Обработка экспериментальных данных текущего испытания включает в себя сбор полученных значений по следующим параметрам:

1. Скорость движения по GPS;
2. Пройденное расстояние по GPS;
3. % нажатия на педаль газа;
4. % нажатия на педаль тормоза;
5. Число оборотов коленчатого вала (RPM).

4.6.2.1 Дорожный заезд №1 при достижении скорости транспортного средства 50 км/ч

4.6.2.1.1 Построение траектории движения

По аналогии с предыдущей обработкой экспериментальных данных определим траекторию движения транспортного средства при скорости движения 50 км/ч (Рисунок 103).

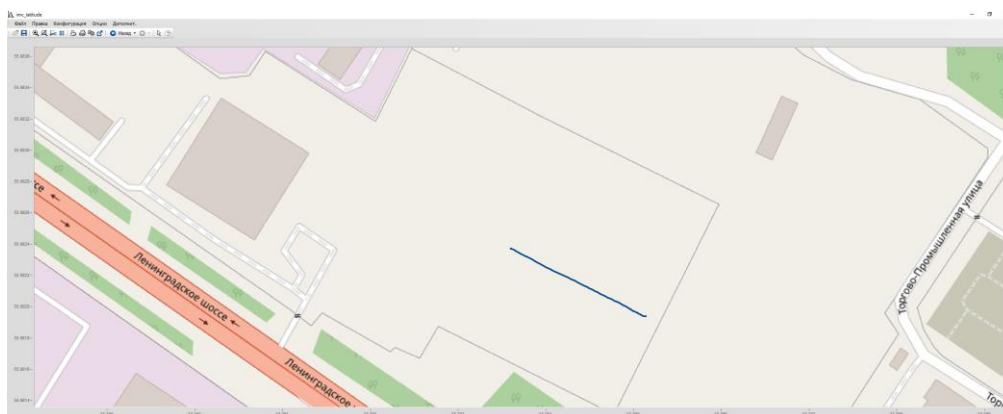


Рисунок 103. График траектории движения при скорости 50 км/ч

4.6.2.1.2 Построение графиков зависимостей параметров скорости движения транспортного средства, пройденного пути, % нажатия педалей газа и тормоза, числа оборотов коленчатого вала

На Рисунок 104 показан график зависимости скорости ТС от пройденного пути.

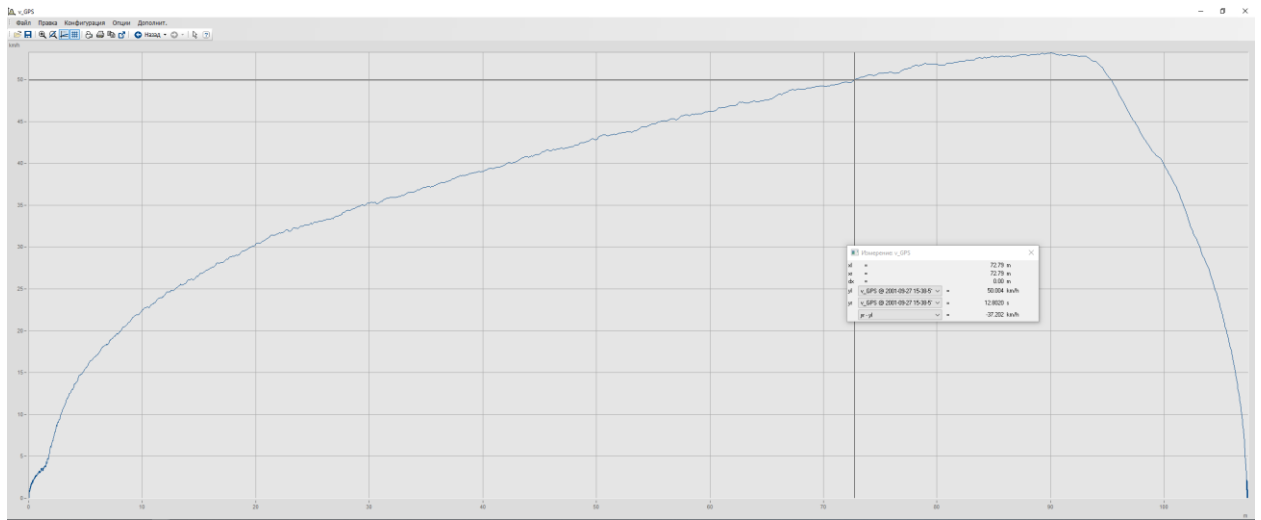


Рисунок 104. График зависимостей скорости движения от пройденного пути

Основываясь на данных графика (Рисунок 104) делаем вывод, что разгон от 0 до 50 км/ч составил 12.8020 секунд, соответственно, на 72.79 метре пройденного пути.

Момент снижения скорости транспортного средства указан на Рисунок 105.

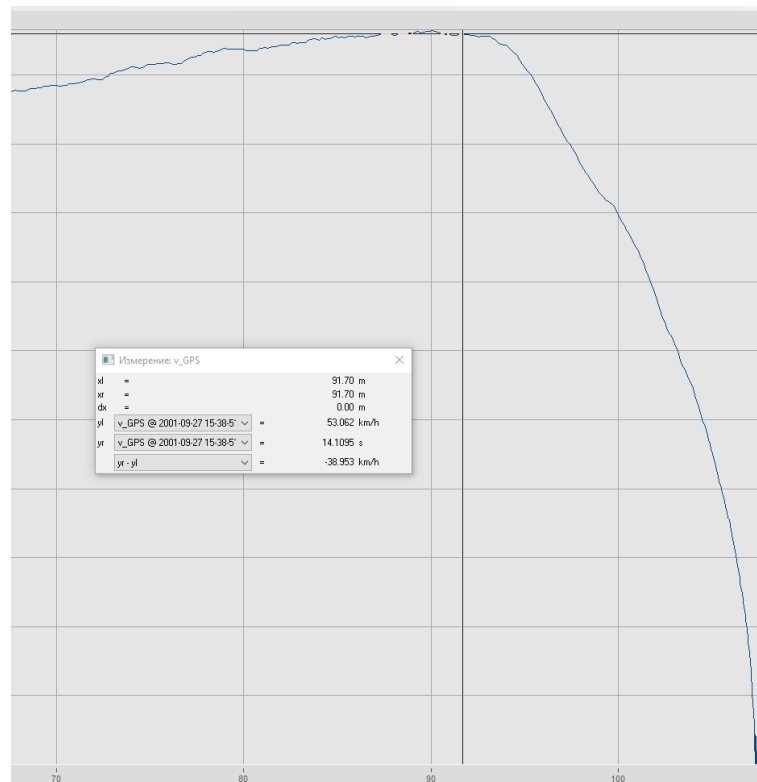


Рисунок 105. Момент снижения скорости транспортного средства

Водитель-испытатель отпустил педаль газа на 13.24 секунде при скорости движения 51.963 км/ч, при пройденном пути 78.954 м.

На Рисунок 108 показан график, который отражает % нажатия педали тормоза от скорости движения транспортного средства и пройденного пути.

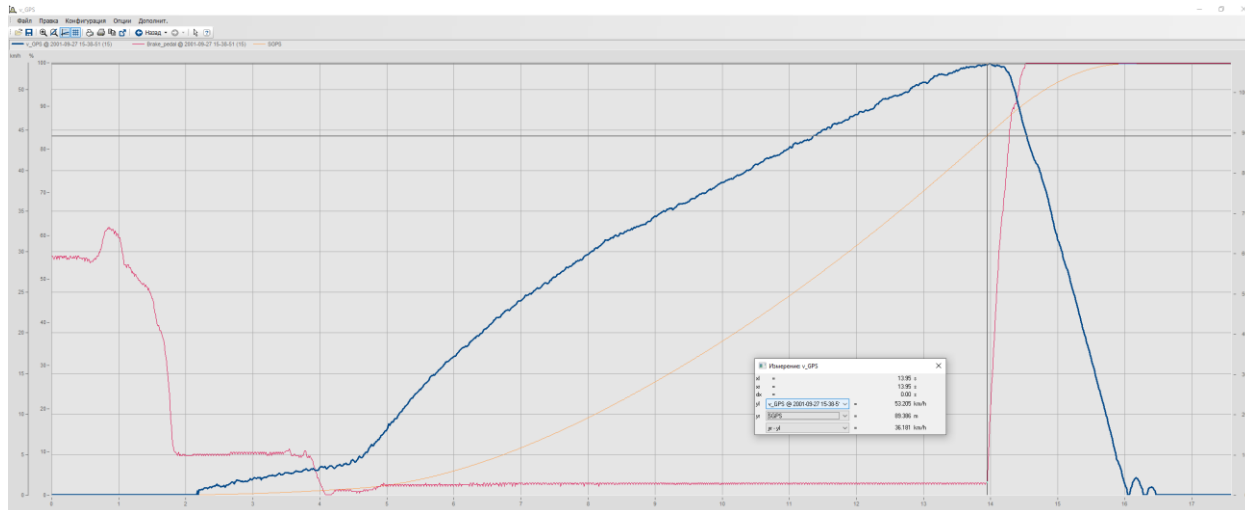


Рисунок 108. Момент нажатия педали тормоза

Водитель-испытатель начинает торможение транспортного средства на 13.95 секунде заезда, 89.386 метре пройденного пути при скорости 53.205 км/ч.

4.6.2.1.3 Выводы по заезду «Разгон от 0 до 50 и торможение»

По общим результатам заезда «Разгон от 0 до 50 км/ч и торможение» определим следующие выводы:

1. Разгон от 0 до 50 км/ч составил 12.8020 секунд (72.79м.);
2. Тормозной путь составил ~ 18м. (17.944м.). Время торможения от 53.205 км/ч составило 2.105 секунды.

4.6.2.2 Дорожный заезд №2 при достижении скорости транспортного средства 60 км/ч

4.6.2.2.1 Построение траектории движения

По аналогии с предыдущей обработкой экспериментальных данных определим траекторию движения транспортного средства при скорости движения 60 км/ч (Рисунок 109Рисунок 103).

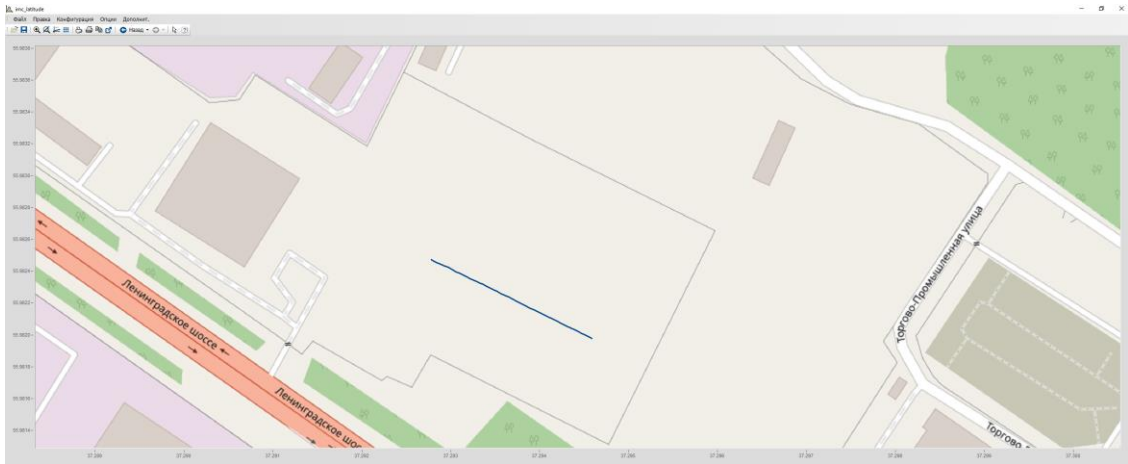


Рисунок 109. График траектории движения при скорости 60 км/ч

4.6.2.2.2 Построение графиков зависимостей параметров скорости движения транспортного средства, пройденного пути, % нажатия педалей газа и тормоза, числа оборотов коленчатого вала

На Рисунок 110 показан график зависимости скорости ТС от пройденного пути.

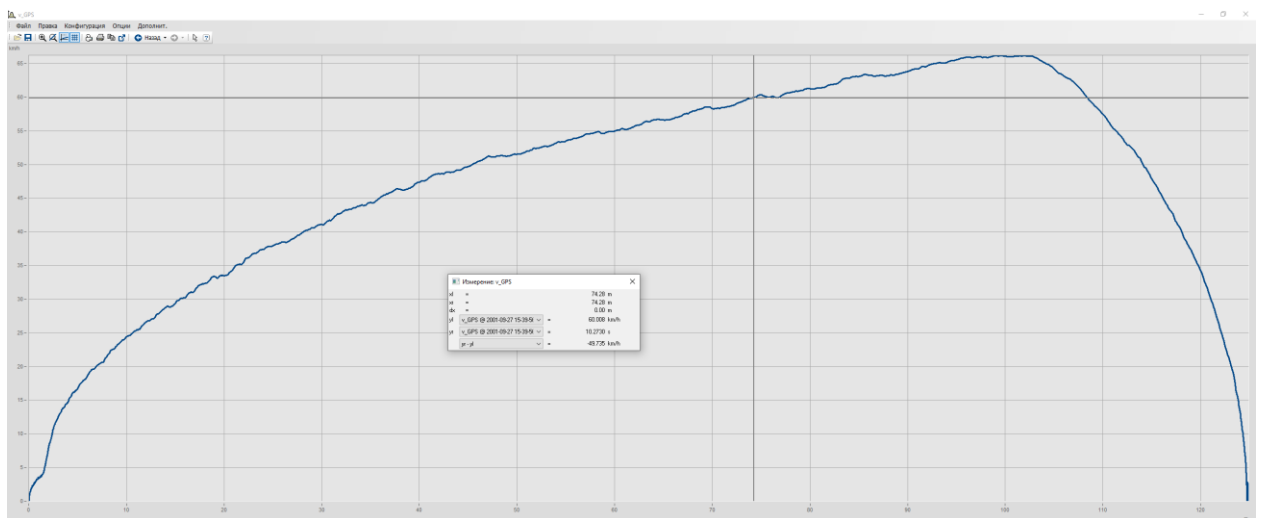


Рисунок 110. График зависимостей скорости движения от пройденного пути

Основываясь на данных графика (Рисунок 110) делаем вывод, что разгон от 0 до 60 км/ч составил 10.2730 секунд, соответственно, на 74.28 метре пройденного пути.

Момент снижения скорости транспортного средства указан на Рисунок 111.

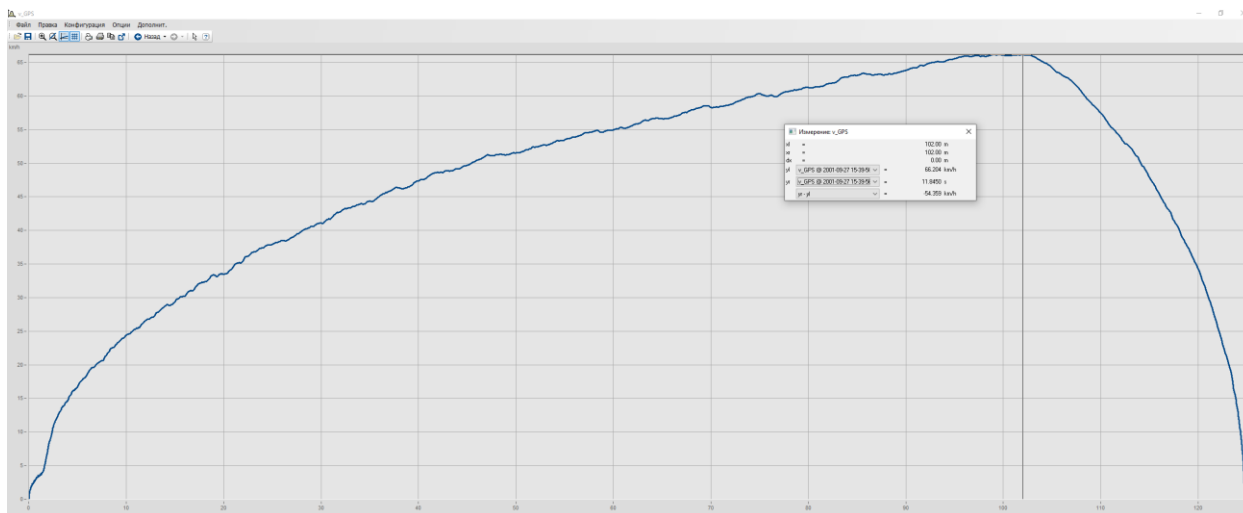


Рисунок 111. Момент снижения скорости транспортного средства

По данным Рисунок 111 видим, что транспортное средство начало снижение скорости на 11.8450 секунде пути при скорости 66.204 км/ч. Пройденный путь транспортного средства составил 102.00 метр.

Данные о полной остановке транспортного средства показаны на Рисунок 112.

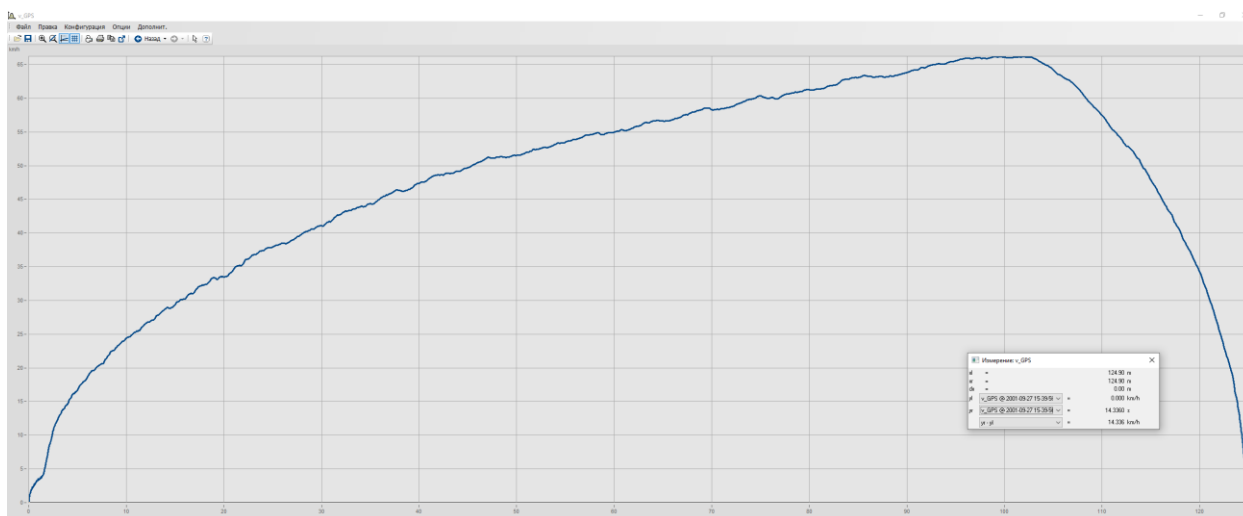


Рисунок 112. Момент полной остановки транспортного средства

Полная остановка автомобиля была зафиксирована на 14.3360 секунде. Пройденный путь от начала движения транспортного средства до полной остановки составил 124.90 метра.

Определим момент убирания ноги с педали газа по графику зависимости скорости, пройденного пути от % нажатия педали газа (Рисунок 113).

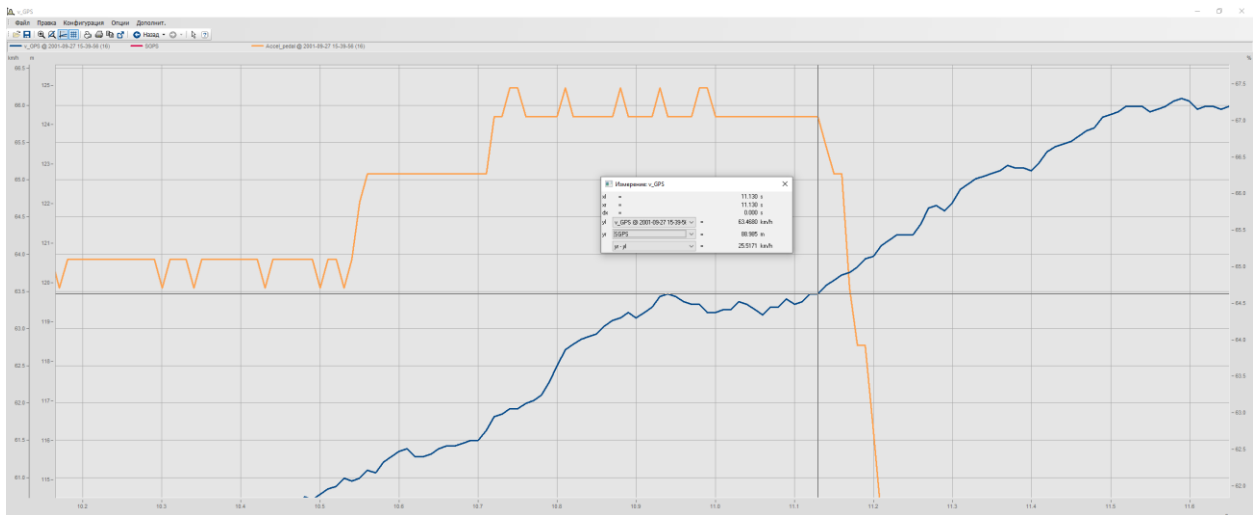


Рисунок 113. График зависимости скорости движения, пройденного пути от % нажатия педали

Водитель-испытатель отпустил педаль газа на 11.130 секунде при скорости движения 63.985 км/ч, при пройденном пути 88.985 м.

На Рисунок 114 показан график, который отражает % нажатия педали тормоза от скорости движения транспортного средства и пройденного пути.

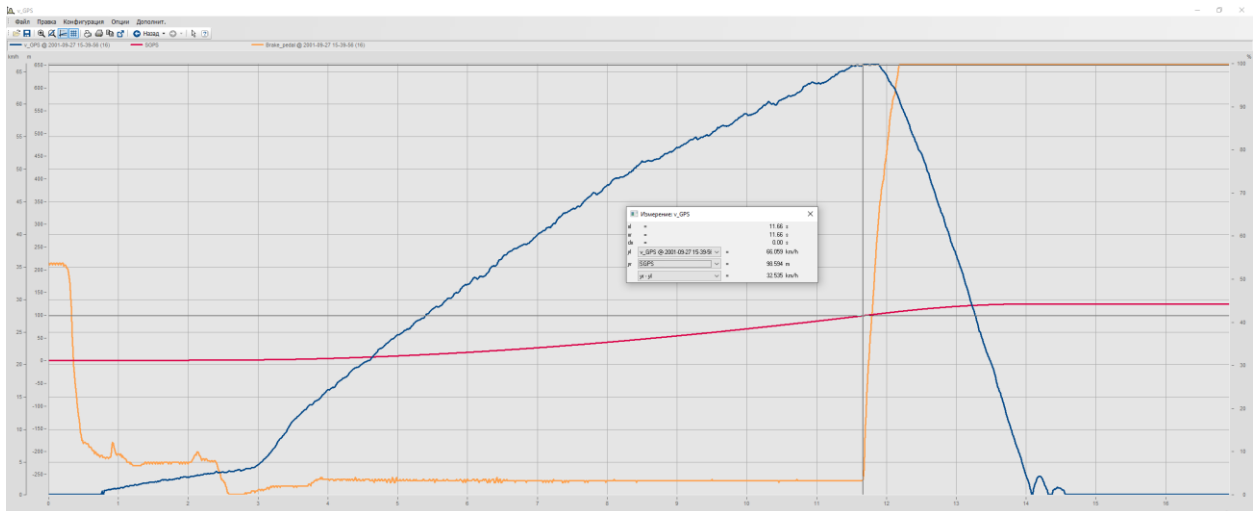


Рисунок 114. Момент нажатия педали тормоза

Водитель-испытатель начал торможение транспортного средства на 11.66 секунде заезда, 98.594 метре пройденного пути при скорости 66.059 км/ч.

4.6.2.2.3 Выводы по заезду «Разгон от 0 до 60 и торможение»

По общим результатам заезда «Разгон от 0 до 60 км/ч и торможение» определим следующие выводы:

1. Разгон от 0 до 60 км/ч составил 10.2730 секунд (74.28.);

2. Тормозной путь составил 26,306м. Время торможения от скорости движения транспортного средства 66.059 км/ч составило 2.676 секунды.

4.6.3 Испытание «Выруливание от препятствия»

4.6.3.1 Дорожный заезд при фиксированном угле рулевого колеса

4.6.3.1.1 Построение траектории движения

Построим траекторию движения транспортного средства для дорожного испытания «Выруливание от препятствия» (Рисунок 115).

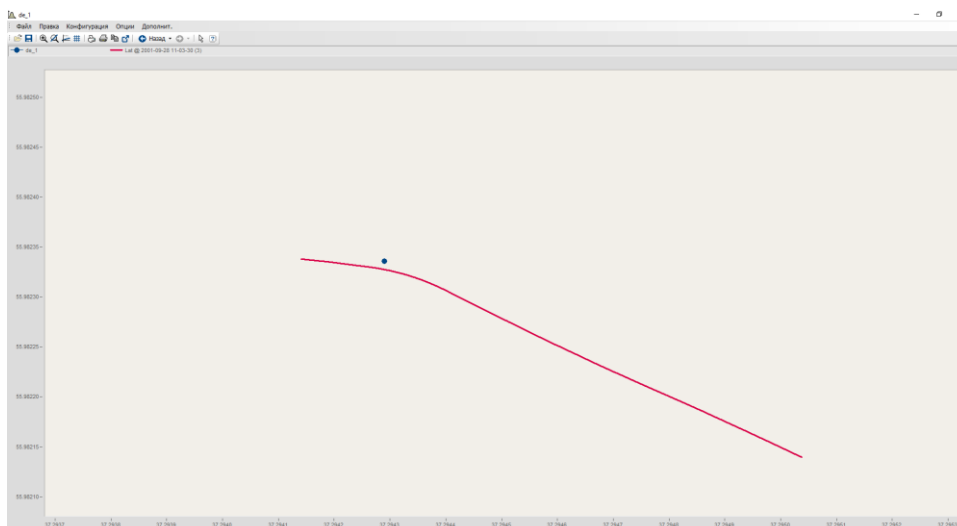


Рисунок 115. График траектории движения с последующим выкруливанием от препятствия

4.6.3.1.2 Построение графиков зависимостей параметров скорости движения транспортного средства, пройденного пути, угла поворота рулевого колеса по шине CAN

Момент выкруливания транспортного средства от препятствия при фиксированном угле поворота рулевого колеса представлен на Рисунок 116.

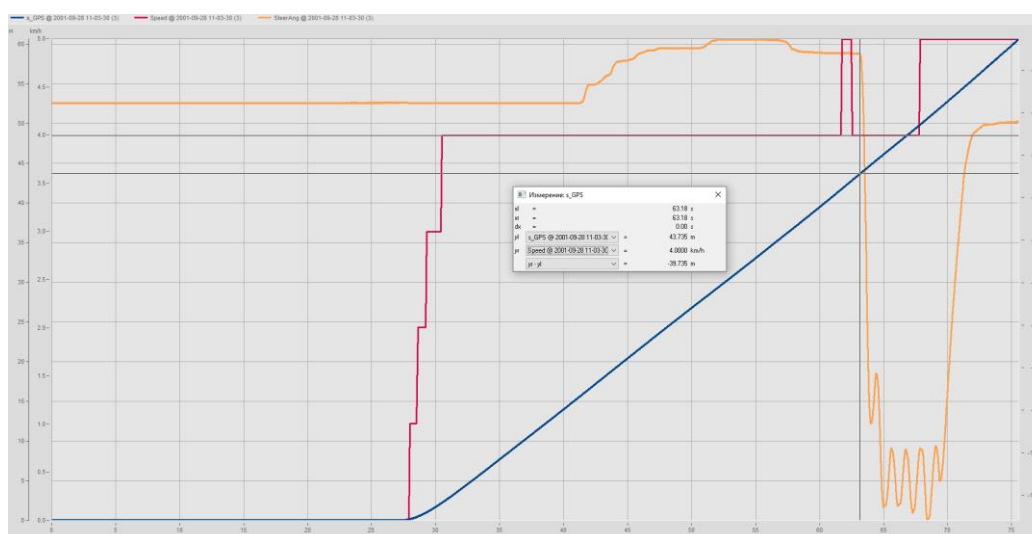


Рисунок 116. Момент выкруливания транспортного средства от препятствия

По данным графика видим, что момент выкруливания транспортного средства происходил на 63.18 секунде, 43.735 метре пути при скорости движения 4 км/ч.

4.6.3.1.3 Построение графика данных лидара

По графику данных лидара также можно увидеть, что механизм автоматического выкруливания транспортного средства от препятствия на 90 градусов в левую сторону движения успешно отработан (Рисунок 117).

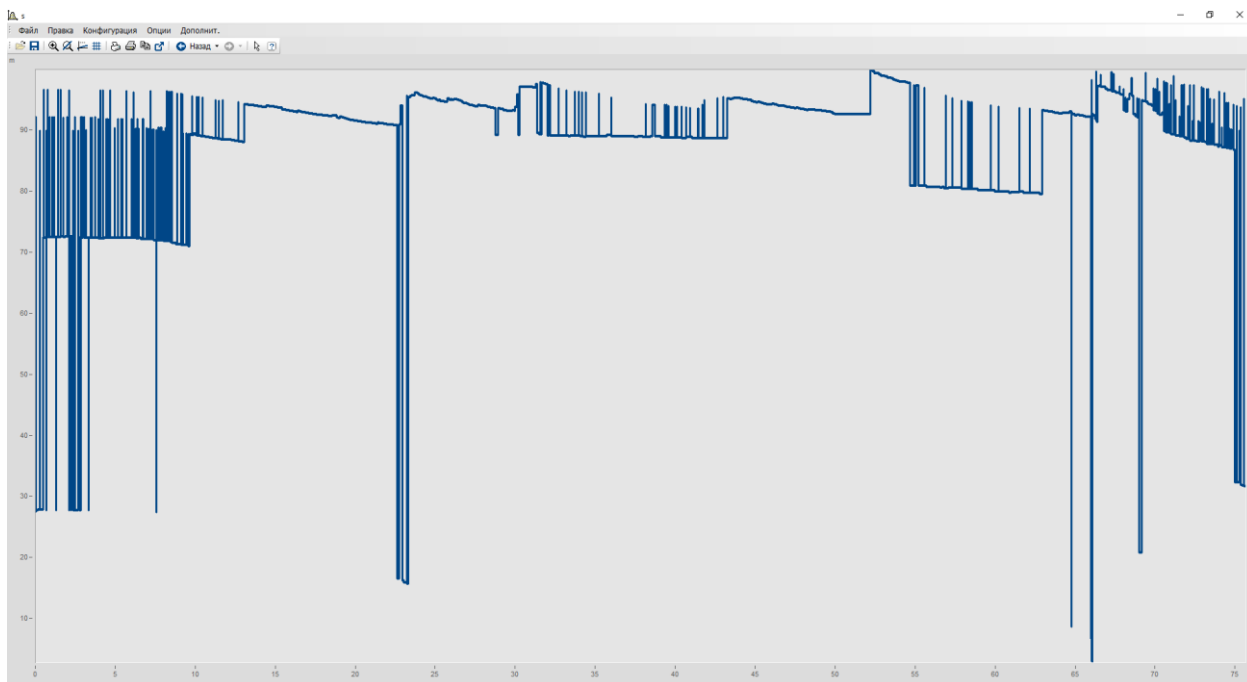


Рисунок 117. График данных лидара

Глава 5 ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

5.1 Сравнение результатов натуральных и виртуальных испытаний

5.1.1 Испытание «Змейка»

5.1.1.1 Дорожный заезд №1 при скорости движения транспортного средства 10 км/ч

Таблица 30. График зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» натуральных и виртуальных испытаний

№ препятствия	Полигонные испытания				Виртуальные испытания				Расхождение (%)	
	t	V	S	α	t	V	S	α	V	α
1→2	9.18	10.941	15.425	292	5.3	9.08421	12.4103	297.311	16.97	1.82
2→3	11.35	11.7	22.449	-471	8.41	10.4771	19.6691	-492.53	10.45	4.57
3→4	14.05	11.6	31.643	467.62	10.51	11.9292	25.0784	488.738	2.84	4.52
4→5	16.04	10.59	37.975	-494	12.91	12.4967	32.7029	-470.7	18	4.72
5→6	18.82	11.804	46.325	457.7	15.17	12.4349	37.5274	441.421	5.34	3.56
6→7	21.23	13.1	55.582	-446	17.77	12.2714	47.7027	-419.584	5.68	5.92

По итогам полученным результатам можно сделать вывод о том, что среднее значение расхождений угла поворота рулевого колеса при выруливании от каждого препятствия составляет 4.18% из 100%, среднее значение скорости движения ТС составляет 9,88% из 100%. Данный факт подтверждает успешное внедрение цифрового двойника экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства.

5.1.1.2 Дорожный заезд №2 при скорости движения транспортного средства 15 км/ч

Таблица 31. График зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» натуральных и виртуальных испытаний

№ препятствия	Полигонные испытания				Виртуальные испытания				Расхождение (%)	
	t	V	S	α	t	V	S	α	V	α
0→1	4.4	4.82	1.190	-57.69	2.43	13.4161	7.01242	12.5851	178.34	121.82
1→2	8.42	16.631	15.74	265.114	3.96	13.6919	12.5389	308.476	17.67	16.36
2→3	9.95	17.875	23.355	-365	6.1	16.7253	20.3387	-492.926	6.43	35.05
3→4	11.45	19.356	31.085	301.663	7.72	18.6528	26.9675	492.823	3.63	63.37
4→5	12.774	20.919	38.615	-357.911	9.21	18.7492	33.8846	-492.479	10.37	37.60
5→6	14.24	19.548	47.050	398.622	9.21	18.7492	33.8846	-492.479	4.49	23.43
6→7	15.75	20.109	55.753	-410.854	$\frac{10.6}{9}$	18.6706	40.4235	492.027	9.41	16.54

По итогам полученным результатам можно сделать вывод о том, что среднее значение расхождения угла поворота рулевого колеса при выруливании от каждого препятствия составляет 32.06% из 100%, среднее значение расходимости скорости движения ТС составляет 8,67% из 100%.

Автоматизированное транспортное средство поддерживало умеренную скорость движения. Анализируя данные угла поворота рулевого колеса, можно сказать, что происходил резкий скачок выруливания, однако наезд на препятствия не произошло, что нельзя сказать о результатах натуральных испытаний, при которых при которых произошел наезд на препятствия № 2, 4, 6.

Данный факт подтверждает успешное внедрение цифрового двойника экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства.

5.1.1.3 Дорожный заезд №3 при скорости движения транспортного средства 20 км/ч

В результате дорожного заезда №3 виртуального испытания при скорости движения транспортного средства 20 км/ч был совершен наезд автоматизированным ТС на препятствия № 4, 5, 6, 7, что опровергает использование технологии при условиях данного заезда. По данной причине было принято решение уменьшить количество препятствий до 4-х штук, расстояние между которыми составляет 14м.

5.1.1.4 Дорожный заезд №4 при скорости движения транспортного средства 30 км/ч

Таблица 32. График зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», «Угол поворота рулевого колеса» натуральных и виртуальных испытаний

№ препятствия	Полигонные испытания				Виртуальные испытания				Расхождение (%)	
	t	V	S	α	t	V	S	α	V	α
0→1	5.91	20.592	6.421	-14.750	1.61	24.6961	5.35758	1.11303	19.93	107.55
1→2	7.53	29.966	17.930	107.298	2.32	32.0031	10.9947	226.212	6.80	110.83
2→3	8.88	35.090	30.419	-170.883	3.88	37.7043	25.8403	-268.949	7.45	57.39
3→4	10.47	37.947	46.474	147.181	5.48	39.4745	41.0783	342.045	4.03	132.40

Анализируя данные заезда № 4, можно сойтись на выводе, что при виртуальном заезде углы поворота транспортного средства были резкими, однако результат был достигнут. Никаких происшествий при данном заезде не было совершено.

5.1.1.5 Дорожный заезд №3 при скорости движения транспортного средства 40 км/ч

Анализируя данные текущего заезда, можно сделать вывод о том, что маршрут в программной среде «Simcenter Prescan» был построен некорректно ввиду того, что углы поворота транспортного средства являются резкими и большими. Также при резком повороте транспортное средство чуть не совершено опрокидывание транспортного средства (Рисунок 118).

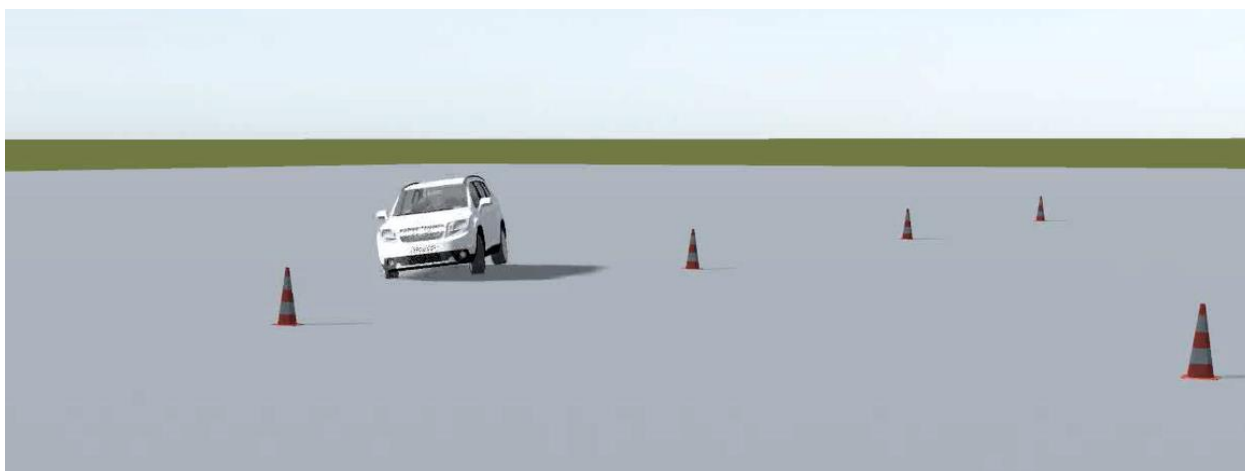


Рисунок 118. Резкий поворот транспортного средства

Результаты натурных испытаний для данного заезда являются идеальными ввиду того, что было соблюдено плавное движение транспортного средства.

5.1.2 Испытание «Разгон и торможение»

5.1.2.1 Дорожный заезд №1 при достижении скорости транспортного средства 50 км/ч

Таблица 33. График зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», натурных и виртуальных испытаний

Наименование цели	Полигонные испытания			Виртуальные испытания			Расхождение (%)		
	t	V	S	t	V	S	t	V	S
Разгон от 0 до 50	12.802	50.004	72.79	10.27	50.0405	74.8074	19.78	0.07	2.77
Момент снижения скорости	14.1095	53.062	91.7	10.27	50.0405	74.8074	27.21	5.69	18.42

Наименование цели	Полигонные испытания			Виртуальные испытания			Расхождение (%)		
	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>
Полное торможение	16.055	0.00	107.33	13.42	0.00	93.3971	16.41	0.00	12.98
Тормозной путь	2.105	53.205	17.944	3.15	50.0405	18.5897	49.64	5.95	3.60

Анализируя данные дорожного заезда № 1 «Разгон от 0 до 50 и торможение», можно сделать вывод о том, что модель виртуальных испытаний является идеальной. Расхождение значения времени разгона при полигонных испытаниях относительно виртуальных составляет 19.78%. Относительно пройденного пути – 2.77%. Аналогично и моменту снижения скорости. Для начала торможения с момента разгона до нажатия на педаль тормоза прошло 1.3075 с, что соответствует средней скорости реакции водителя, в то время как беспилотное транспортное средство сразу же приступило к торможению. При этом скорость реакции алгоритма составила 0 секунды.

Данный факт подтверждает успешное внедрение цифрового двойника экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства.

5.1.2.2 Дорожный заезд №2 при достижении скорости транспортного средства 60 км/ч

Таблица 34. График зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», натуральных и виртуальных испытаний

Наименование цели	Полигонные испытания			Виртуальные испытания			Расхождение (%)		
	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>
Разгон от 0 до 60	10.273	60.008	74.28	10.68	60.032	95.959	3.96	0.04	29.19
Момент снижения скорости	11.845	66.204	102	10.68	60.032	95.959	9.84	9.32	5.92
Полное торможение	14.336	0.00	124.9	14.74	0.00	117.856	2.82	0.00	5.64
Тормозной путь	2.676	66.059	26.306	4.06	60.032	21.897	51.72	9.12	16.76

Анализируя данные дорожного заезда № 2 «Разгон от 0 до 60 и торможение», можно сделать вывод о том, что модель виртуальных испытаний является идеальной. Расхождение значения времени разгона при виртуальных испытаниях относительно полигонных составляет 3,96%. Относительно пройденного пути – 29,19%. Аналогично и моменту снижения скорости. Расхождение значения полной остановки транспортного средства при полигонных испытаниях относительно виртуальных составило 2.82%. Для начала торможения с момента разгона до нажатия на педаль тормоза прошло 1.572 с, что соответствует больше средней скорости реакции водителя, в то

время как беспилотное транспортное средство сразу же приступило к торможению. При этом скорость реакции алгоритма составила 0 секунды. Исходя из полученных данных принято считать, что применению технологии при данном заезде имеет место быть, так как результаты испытания были схожи.

5.1.3 Испытание «Выруливание от препятствия»

Таблица 35. График зависимостей параметров «Скорость», «Пройденное расстояние», натуральных и виртуальных испытаний

Наименование цели	Полигонные испытания			Виртуальные испытания			Расхождение (%)		
	t	V	S	t	V	S	t	V	S
Выруливание от препятствия	63.18	4	43.735	27.19	6	44.1356	-	-	0.92

Анализируя данные, можно сделать вывод, что были повторены натуральные испытания в программной среде «Simcenter Prescan». Выруливание транспортного средства на полигоне произошло на 43.735 метре пути, на виртуальном полигоне в программной среде «Simcenter Prescan» на 44.1356 метре пути. Расхождения минимальны и составляют 0.92%.

Исходя из полученных данных принято считать, что применение технологии при данном заезде актуально, так как результаты испытания были схожи.

5.2 Заключение о показателях точности

Результаты, полученные при сравнении данных натуральных и виртуальных испытаний, позволяют с точностью определить значимость внедрения технологии «Цифровой двойник» в сферу автомобилестроения в целом. Большинство расхождений данных цифрового двойника и физического объекта являются приближенными значениями, которые можно усовершенствовать при оптимизации технологии. Сформированные результаты являются отличным стартом при полноценной разработке и дальнейшей оптимизации высокоавтоматизированного транспортного средства.

Глава 6 ТОПОЛОГИЯ СБОРА ДАННЫХ

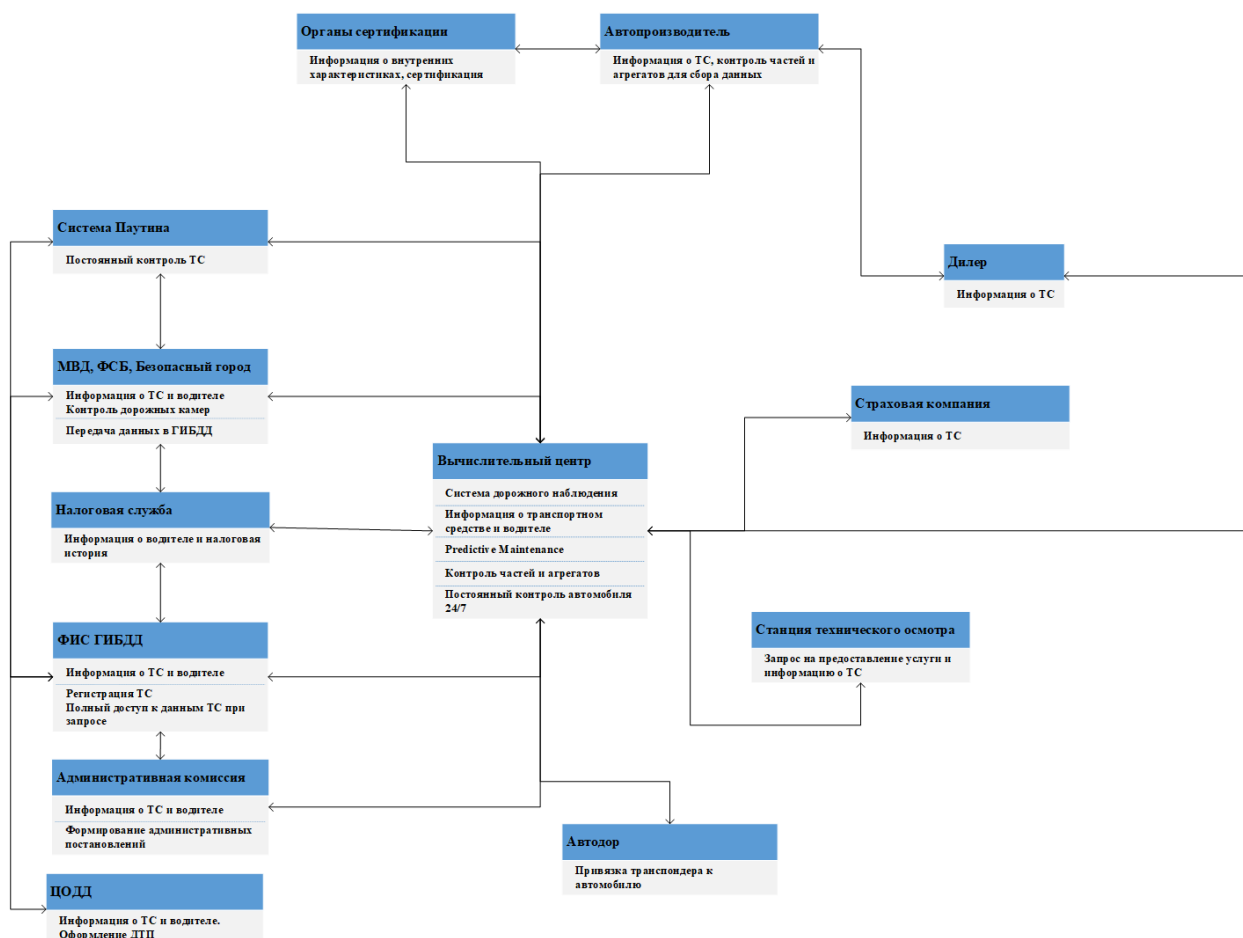


Рисунок 119. Топология сбора данных

Для разработки топологии сбора данных между высокоавтоматизированным транспортным средством и контролирующими органами определены следующие действующие лица:

1. Автодор;
2. Автомобильные производители;
3. Административная комиссия;
4. ГИБДД;
5. Дилерские центры;
6. МВД, ФСБ, «Безопасный город»;
7. Налоговые службы;
8. Органы сертификации;
9. Система «Паутина».
10. Станции ТО;

11. Страховые компании;

12. ЦОДД;

Топология сбора данных (Рисунок 119) включает в себя взаимодействие вышеуказанных действующих лиц и разрабатываемого высокоавтоматизированного транспортного средства. Благодаря данному взаимодействию у контролирующих органов появится возможность упростить регистрацию транспортных средств и, при необходимости, собирать данные в реальном времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате практической деятельности выпускной квалификационной работы были определены исходные данные физического объекта для импорта цифрового двойника, описаны математические модели, использующиеся при симуляции поведения транспортного средства при различных видах испытаний, разработан цифровой двойник экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства, разработана концептуальная модель топологии сбора данных разрабатываемого автомобиля с различными контролирующими органами (ЦОДД, ГИБДД, Налоговые органы, Автомобильные производители, Дилеры, Транспортные агрегаторы, Органы сертификации и др.).

Основные положения внедряемой технологии были доложены и обсуждены на международной конференции «Наука и техника в дорожной отрасли» (Москва, 2021).

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были решены следующие задачи:

1. Доработана 3D-модель цифрового двойника на базе автомобиля «Chevrolet Orlando»;
2. Определены входные и выходные параметры при симуляции движения виртуального двойника;
3. Построена карта заездов для различных видов испытаний;
4. Разработана модель определения пройденного пути на основе данных GPS-координат (Lat, Long);
5. Проведены натурные испытания на автополигоне «МАДИ» (Глава 4);
6. Проведены виртуальные испытания в программных средах «Siemens Prescan» и «MATLAB&Simulink» (Глава 3).
7. Проведено сравнение натуральных и виртуальных испытаний, зафиксированы выводы (Глава 5).
8. Систематизированы полученные результаты, сформированы научные выводы (5.2);

9. Разработана топология взаимодействия высокоавтоматизированных автономных транспортных средств с различными контролирующими органами (Глава 6).

Значимость выпускной квалификационной работы заключается во внедрении технологии «Цифровой двойник» в автомобилестроение в целом, разработке новых методов анализа и расчета в виртуальном пространстве, на основе исходных данных физического объекта, оптимизации транспортных средств, а также поддержке транспортных средств на протяжении всех этапов жизненного цикла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ben Watts. Digital Twins in the Automotive Industry. 2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.challenge.org/knowledgeitems/digital-twins-in-the-automotive-industry/> - Дата обращения: 15.01.2021.
2. BFM. Цифровые двойники. 2020 - [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.bfm.ru/news/459018> - Дата обращения: 07.04.2021.
3. Bosch Mobility Solutions Predictive Diagnostics. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/software-and-services/predictive-diagnostics/> - Дата обращения: 27.05.2021.
4. Cassidy Shell. Predictive Maintenance Reduces Vehicle Downtime and Makes Connected Vehicles Safe. 2020 – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.cleantech.com/predictive-maintenance-reduces-vehicle-downtime-and-makes-connected-vehicles-safe/> - Дата обращения: 03.06.2021.
5. Chopei Marta. Predictive maintenance in the automotive industry: How to make it work for you. 2021 - [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.n-ix.com/predictive-maintenance-automotive-industry/> - Дата обращения: 17.03.2021.
6. Contus. CONTUS' Digital Twin Solution for Electric Vehicle Manufacturing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.contus.com/digital-twin-solution/> - Дата обращения: 20.01.2021.
7. Digital Twin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wipro.com/process-and-industrial-manufacturing/digital-twin/> - Дата обращения: 25.01.2021.
8. Digital Twin in the Automotive Industry: Driving Physical-Digital Convergence [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.tcs.com/content/dam/tcs/pdf/Industries/manufacturing/abstract/industry-4-0-and-digital-twin.pdf> - Дата обращения: 20.01.2021.

9. Ed Fontes. Цифровые двойники: не просто модный тренд. 2019. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/digital-twins-not-just-hype/> - Дата обращения: 23.12.2020.

10. Gaute Storhaug. Digital twins and sensor monitoring. 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/expert-story/maritime-impact/Digital-twins-and-sensor-monitoring.html> - Дата обращения: 16.12.2020.

11. Hum3d. Chevrolet Orlando 2011 3D-model. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://hum3d.com/3d-models/chevrolet-orlando-2011> - Дата обращения: 11.01.2021.

12. it.ua. PdM – предиктивное обслуживание оборудования. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoj-dvojnik-digital-twin> - Дата обращения: 11.04.2021.

13. it.ua. Цифровой двойник (digital twin). – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoj-dvojnik-digital-twin> <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoj-dvojnik-digital-twin> - Дата обращения: 11.04.2021.

14. Parks J.T. Simulation of riding a bicycle using Simulink. Проектная работа. К.: Калифорнийский Государственный Университет. 2010. – [Электронный ресурс] – Дата обращения: 25.02.2021.

15. Schneider. Практическое руководство для оценки возможностей усовершенствования технического обслуживания. Презентация. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Brochure&p_File_Name=Практическое

[+руководство+для+оценки+возможностей+усовершенствования+технического+обслуживания.pdf](#) – Дата обращения: 23.06.2021.

16. Siemens PLM Software. Simcenter Prescan User Manual. 2019 – [Электронный ресурс] – Дата обращения: 15.02.2021.

17. Wikipedia. Predictive maintenance. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Predictive_maintenance - Дата обращения: 15.03.2021.

18. Боровков А.И. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное / Прохоров А., Лысачев М. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил. Дата обращения: 25.01.2021.

19. Дайджест №3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/10_oktober/Digest2019-3_Pages.pdf – Дата обращения: 18.12.2020.

20. Как цифровые двойники помогают российской промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rb.ru/longread/digital-twin/> - (Дата обращения: 09.01.2021).

21. КАМАЗ представил компактный городской электромобиль «КАМА-1» - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rostec.ru/news/kamaz-predstavil-kompaktnyy-gorodskoy-elektromobil-kama-1/> - Дата обращения: 20.12.2020.

22. Компоненты Индустрии 4.0: Цифровые двойники. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.digitaltwin.ru/media/resources/REM_Krugliy_stol_4IR.pdf – Дата обращения – 12.12.2020.

23. Потапов В.П. Цифровые двойники как технология создания нового поколения систем экологического мониторинга горнопромышленных комплексов / Шокин Ю.И., Юрченко А.В. – Н.: Институт вычислительных технологий СО РАН. 2019. [Электронный ресурс]. –

Режим доступа: http://www.ict.nsc.ru/jspui/bitstream/ICT/4694/6/DICR-2019-V3_p09-16.pdf - (Дата обращения: 17.01.2021).

24. Радионов А.А. Математическая модель движения автомобиля / Чернышев А.Д. 2015 [Электронный ресурс]. – Дата обращения 27.12.2020.

25. Смазневич И. Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности. – 4science. 2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti> – (Дата обращения: 19.12.2020).

26. Технология цифровых двойников. 2019. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://future2day.ru/tehnologiya-cifrovyyh-dvoynikov> Дата обращения: 15.01.2021.

27. Халитов И.М. Разработка системы диспетчерского контроля и управления оборудованием добычи нефти в концепции комплексной оптимизации добычи на сложных нефтяных месторождениях. Магистерская диссертация. Т: «Томский Политехнический Университет». 2019. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/54465/1/TPU726921.pdf> - Дата обращения: 18.03.2021.

28. Цифровой двойник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cadfem-cis.ru/products/digital-twin/> - Дата обращения: 20.01.2021.

29. Цифровой двойник как основа для разработки современных инновационных изделий. Опыт УрФУ - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.итопк.рф/wp-content/uploads/2019/04/12.-SHakirov-A.A.-7.pdf> – Дата обращения: 17.12.2020.

30. ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК НА ПРОИЗВОДСТВЕ: ЗАДАЧИ, ВОПРОСЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.up->

pro.ru/library/information_systems/project/d7fb9dd59e1ffa29.html – Дата обращения: 11.01.2021.

31. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ЭКСПЕРТНО АНАЛИТИЧЕСКИЙ ДОКЛАД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoynik.pdf - Дата обращения: 17.01.2021.

32. Цифровые испытания авиационных ГТД – возможности и перспективы – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.remmag.ru/upload_data/files/2019-04/CIAM.pdf - Дата обращения: 23.12.2020.

33. Шадрин С.С. Методология создания систем управления движением автономных колесных транспортных средств, интегрированных в интеллектуальную транспортную среду. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: «МАДИ». 2017 – 400с., ил. [Электронный ресурс] – Дата обращения: 25.02.2021.

34. Технические и динамические характеристики Chevrolet Orlando 1.8 – [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:LNkhK3H_bn0J:https://www.cluborlando.ru/harakteristiki-chevrolet-orlando-evropa.html+&cd=12&hl=ru&ct=clnk&gl=ru – Дата обращения: 17.03.2021.

35. Маклаков Н.А. Исследование и перспективы развития беспилотных автомобилей в Российской Федерации. Отчет по практике. – М.: «МАДИ». 2020 – 40с., ил. – Дата обращения: 17.04.2021.

36. Маклаков Н.А. Разработка цифрового двойника экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства. Преддипломная практическая работа. – М.: «МАДИ». 2021 – 26с., ил. – Дата обращения: 17.04.2021.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)

«Разработка цифрового двойника экспериментального высокоавтоматизированного транспортного средства»

гр. 2МИМ, Маклаков Никита Александрович
кафедра «Автомобили»

Руководитель: Шадрин Сергей Сергеевич, д.т.н., профессор

1. Общее положение технологии «Цифровой двойник»

Цифровой двойник – программный аналог физического объекта, включающий в себя модели физического поведения объекта, позволяющий моделировать поведение реального объекта в условиях внешней среды и различных факторов (помех, погодных условий, неровностей).



Рисунок 1. Цифровой двойник

2. Типы технологии «Цифровой двойник» (Майкл Гривз)



Рисунок 2. Типы «Цифровых двойников»

3. Цели и задачи реализуемые при внедрении технологии «Цифровой двойник»



Рисунок 3. Цели и задачи при внедрении «ЦД»

4. Концепция блока взаимодействия реального и цифрового объекта и последующей поддержки принятия решений

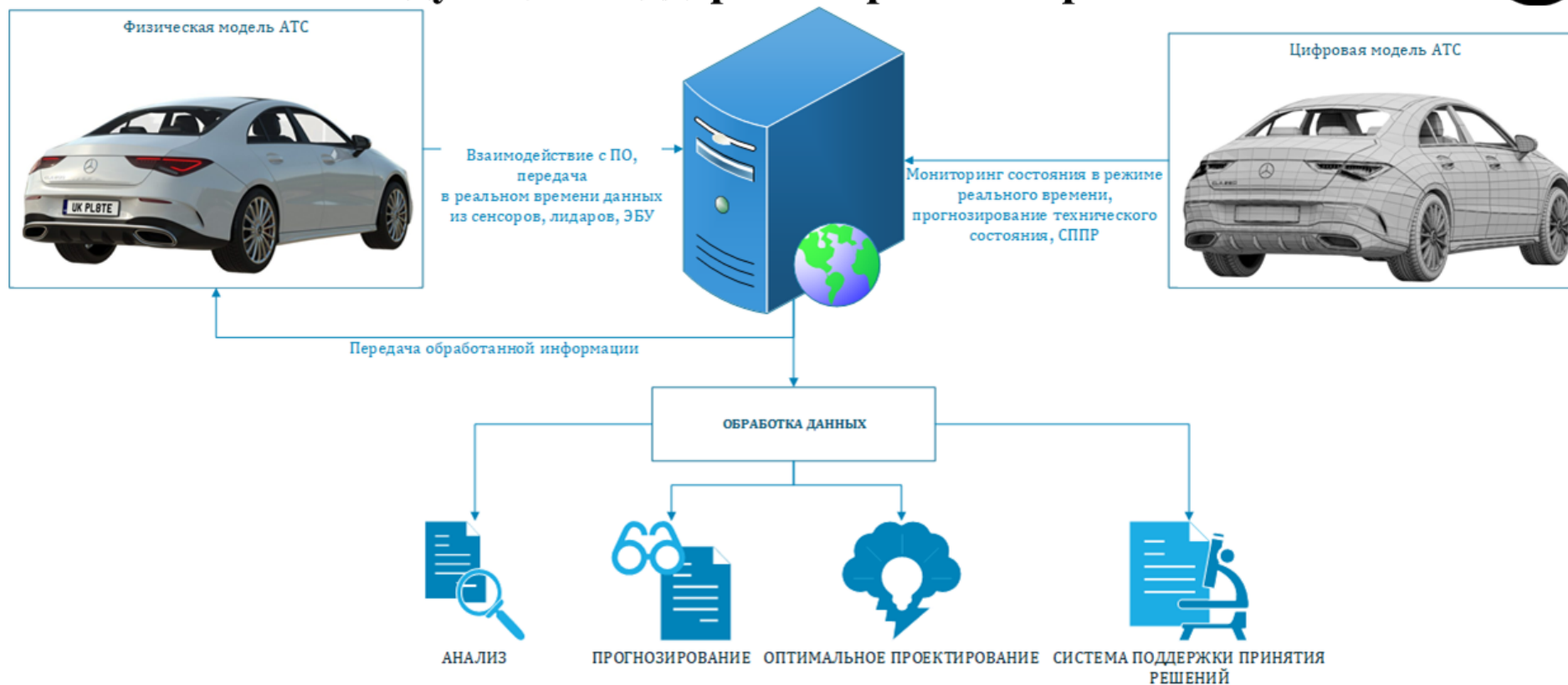


Рисунок 4. Концепция взаимодействия физического и виртуального объектов

5. Мониторинг и прогнозирование технического состояния (Predictive Maintenance)

Аналитика и принятие решения АТС на раннем этапе = решение аварийных и непредвиденных ситуаций



Рисунок 5. Алгоритм взаимодействия и контроля состояния ТС

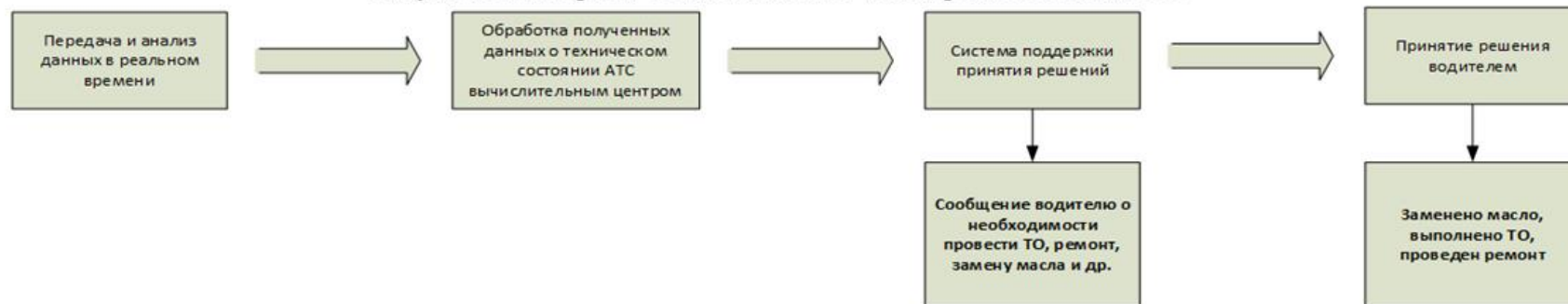


Рисунок 6. Алгоритм принятия решений для Predictive Maintenance

6. Разработка виртуального двойника физического объекта



- Разработка и доработка 3D-модели в Autodesk 3ds Max 2021
- Создание точек координат для привязки колес
- Импорт данных в Siemens Prescan
- Занесение данных о технических и динамических характеристиках



Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Рисунок 7. Виртуальное представление цифрового двойника

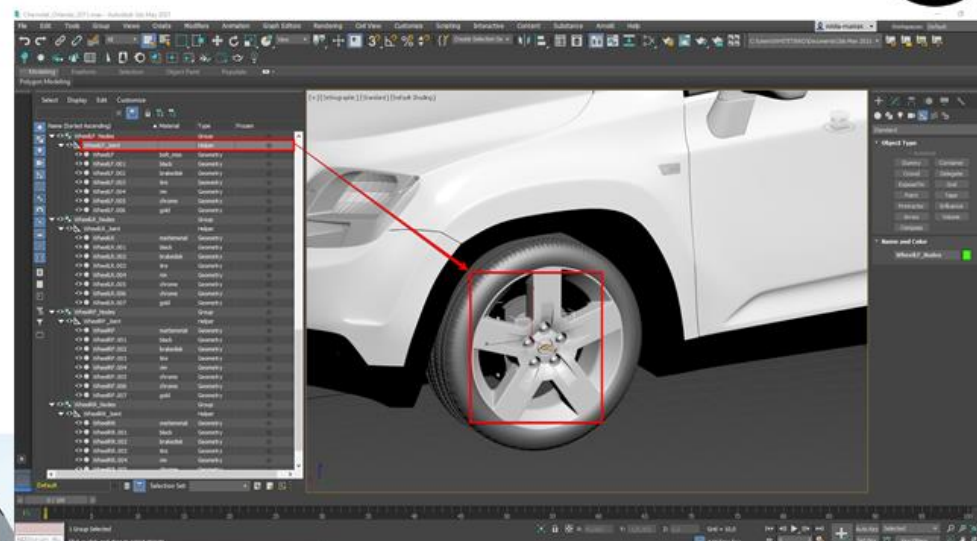


Рисунок 8. Разработка виртуального двойника

7. Программа испытаний

Натурные испытания	Виртуальные испытания
Испытание «Змейка» при скоростях движения в 10, 15, 20, 30, 40 км/ч	Испытание змейка при скоростях движения в 10, 15, 20, 30, 40 км/ч
Испытание «Разгон и торможение» при скоростях движения в 50, 60 км/ч	Испытание «Разгон и торможение» при скоростях движения в 50, 60 км/ч
Выруливание от препятствия за 10 м. до объекта на 90 градусов в левую сторону движения	Выруливание от препятствия за 10 м. до объекта на 90 градусов в левую сторону движения

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)



Рисунок 9. Разметка испытания «Змейка»

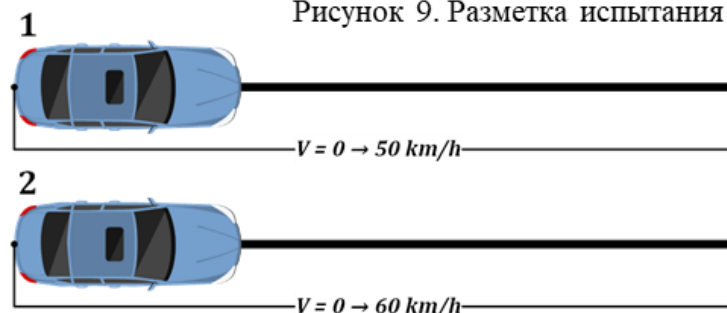


Рисунок 10. Разметка испытания «Разгон и торможение» при различных скоростях движения транспортного средства

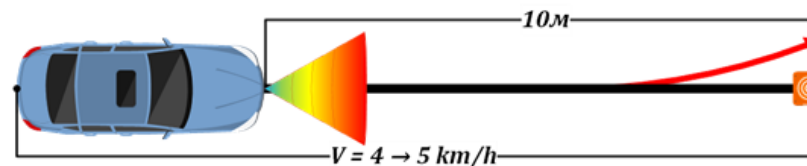


Рисунок 11. Разметка испытания «Выруливание от препятствия»

8. Проектирование маршрутов для каждого испытания в программной среде «Simcenter Prescan»

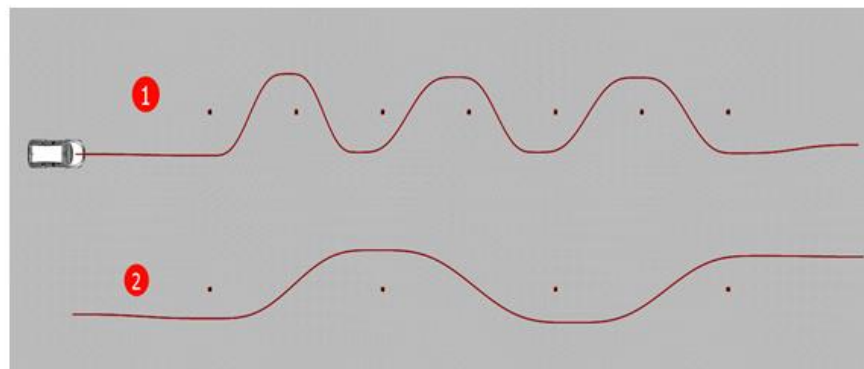


Рисунок 12. Разметка «Змейка»

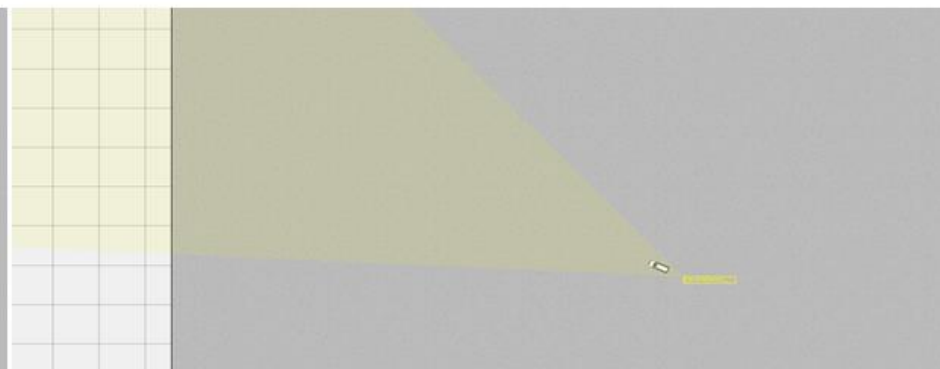


Рисунок 13. Разметка «Разгон и торможение»



Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)

Рисунок 14. Разметка «Выруливание от препятствия»

9. Обработка экспериментальных данных натуральных и виртуальных испытаний



Рисунок 15. Проведение эксперимента «Змейка»



Рисунок 16. Результаты эксперимента «Змейка»



Рисунок 17. Проведение эксперимента «Змейка»
 Московский автомобильно-дорожный государственный
 технический университет (МАДИ)



Рисунок 18. Результаты эксперимента «Змейка»

10. Сравнение экспериментальных данных натуральных и виртуальных испытаний



№ препятствия	Полигонные испытания				Виртуальные испытания				Расхождение (%)	
	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>a</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>a</i>	<i>V</i>	<i>a</i>
1→2	9.18	10.941	15.425	292	5.3	9.08421	12.4103	297.311	16.97	1.82
2→3	11.35	11.7	22.449	-471	8.41	10.4771	19.6691	-492.53	10.45	4.57
3→4	14.05	11.6	31.643	467.62	10.51	11.9292	25.0784	488.738	2.84	4.52
4→5	16.04	10.59	37.975	-494	12.91	12.4967	32.7029	-470.7	18	4.72
5→6	18.82	11.804	46.325	457.7	15.17	12.4349	37.5274	441.421	5.34	3.56
6→7	21.23	13.1	55.582	-446	17.77	12.2714	47.7027	-419.584	5.68	5.92

Рисунок 19. Змейка. Заезд №1 $V = 10$ км/ч

№ препятствия	Полигонные испытания				Виртуальные испытания				Расхождение (%)	
	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>a</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>a</i>	<i>V</i>	<i>a</i>
0→1	4.4	4.82	1.190	-57.69	2.43	13.4161	7.01242	12.5851	178.34	121.82
1→2	8.42	16.631	15.74	265.114	3.96	13.6919	12.5389	308.476	17.67	16.36
2→3	9.95	17.875	23.355	-365	6.1	16.7253	20.3387	-492.926	6.43	35.05
3→4	11.45	19.356	31.085	301.663	7.72	18.6528	26.9675	492.823	3.63	63.37
4→5	12.774	20.919	38.615	-357.911	9.21	18.7492	33.8846	-492.479	10.37	37.60
5→6	14.24	19.548	47.050	398.622	9.21	18.7492	33.8846	-492.479	4.49	23.43
6→7	15.75	20.109	55.753	-410.854	10.69	18.6706	40.4235	492.027	9.41	16.54

Рисунок 20. Змейка. Заезд №2 $V = 15$ км/ч

№ препятствия	Полигонные испытания				Виртуальные испытания				Расхождение (%)	
	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>a</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>a</i>	<i>V</i>	<i>a</i>
0→1	5.91	20.592	6.421	-14.750	1.61	24.6961	5.35758	1.11303	19.93	107.55
1→2	7.53	29.966	17.930	107.298	2.32	32.0031	10.9947	226.212	6.80	110.83
2→3	8.88	35.090	30.419	-170.883	3.88	37.7043	25.8403	-268.949	7.45	57.39
3→4	10.47	37.947	46.474	147.181	5.48	39.4745	41.0783	342.045	4.03	132.40

Рисунок 21. Змейка. Заезд №4 $V = 30$ км/ч

Наименование цели	Полигонные испытания			Виртуальные испытания			Расхождение (%)		
	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>
Разгон от 0 до 50	12.802	50.004	72.79	10.27	50.0405	74.8074	19.78	0.07	2.77
Момент снижения скорости	14.1095	53.062	91.7	10.27	50.0405	74.8074	27.21	5.69	18.42
Полное торможение	16.055	0.00	107.33	13.42	0.00	93.3971	16.41	0.00	12.98
Тормозной путь	2.105	53.205	17.944	3.15	50.0405	18.5897	49.64	5.95	3.60

Рисунок 22. Разгон и торможение. Заезд №1 $V = 50$ км/ч

Наименование цели	Полигонные испытания			Виртуальные испытания			Расхождение (%)		
	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>
Разгон от 0 до 60	10.273	60.008	74.28	10.68	60.032	95.959	3.96	0.04	29.19
Момент снижения скорости	11.845	66.204	102	10.68	60.032	95.959	9.84	9.32	5.92
Полное торможение	14.336	0.00	124.9	14.74	0.00	117.856	2.82	0.00	5.64
Тормозной путь	2.676	66.059	26.306	4.06	60.032	21.897	51.72	9.12	16.76

Рисунок 23. Разгон и торможение. Заезд №2 $V = 60$ км/ч

Наименование цели	Полигонные испытания			Виртуальные испытания			Расхождение (%)		
	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>S</i>
Выруливание от препятствия	63.18	4	43.735	27.19	6	44.1356	-	-	0.92

Рисунок 24. Выруливание от препятствия на 90 градусов

11. Сравнение натуральных и виртуальных испытаний. Результаты



Результаты, полученные при сравнении данных натуральных и виртуальных испытаний, позволяют с точностью определить значимость внедрения технологии «Цифровой двойник» в сферу автомобилестроения в целом. Большинство расхождений данных цифрового двойника и физического объекта являются приближенными значениями, которые можно усовершенствовать при оптимизации технологии. Сформированные результаты являются отличным стартом при полноценной разработке и дальнейшей оптимизации высокоавтоматизированного транспортного средства.



Видео 1. Натурный и виртуальный заезды змейкой

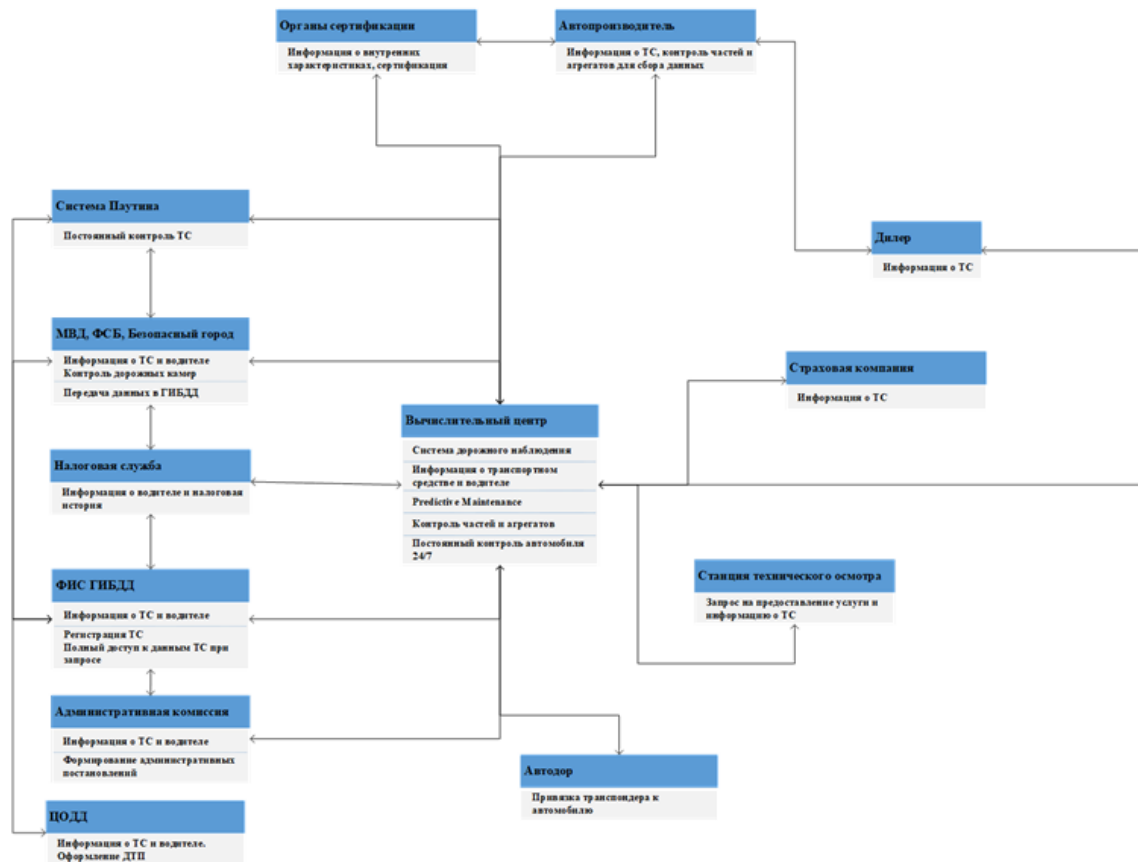
Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)



Видео 2. Натурный и виртуальный заезды. Разгон и торможение

12. Концептуальная топология сбора данных

Концептуальная модель сбора данных позволяет оптимизировать систему получения информации для каждого контролирующего органа.





13. Результаты и выводы

- Доработана 3D-модель цифрового двойника на базе автомобиля «Chevrolet Orlando»;
- Определены входные и выходные параметры при симуляции движения виртуального двойника;
- Построена карта заездов для различных видов испытаний;
- Разработана модель определения пройденного пути на основе данных GPS-координат;
- Проведены натурные испытания на автополигоне «МАДИ» (Глава 4);
- Проведены виртуальные испытания в программных средах «Siemens Prescan» и «MATLAB&Simulink» (Глава 3).
- Проведено сравнение натурных и виртуальных испытаний, зафиксированы выводы (Глава 5).
- Систематизированы полученные результаты, сформированы научные выводы;
- Разработана топология взаимодействия высокоавтоматизированных автономных транспортных средств с различными контролирующими органами.

Значимость выпускной квалификационной работы заключается во внедрении технологии «Цифровой двойник» в автомобилестроение в целом, разработке новых методов анализа и расчета в виртуальном пространстве, на основе исходных данных физического объекта, оптимизации транспортных средств, а также поддержке транспортных средств на протяжении всех этапов жизненного цикла.

Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



nikita-maklakov97@yandex.ru

Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)

15