

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЁВА»

Институт двигателей и энергетических установок
Кафедра автоматических систем энергетических установок

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

«АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТЬЮ ПОДВЕСКИ
АВТОМОБИЛЯ»

по направлению подготовки 15.03.04
«Автоматизация технологических процессов и производств»
(уровень бакалавриата)
профиль «Мехатронные и робототехнические комплексы»

Студент _____  _____ М.Э. Азизов

Руководитель ВКР, доцент, к.т.н. _____ Ю.А. Федотов

Нормоконтролер, доцент, к.т.н. _____ О.Г. Бабаев



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Кафедра АСЭУ

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой

_____ /Шахматов Е.В./

«___» _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ РАБОТУ БАКЛАВРА

Студенту группы 2414 Азизову Мирату Эльверовичу

1 ТЕМА ВЫПУСКНОЙ РАБОТЫ: *«Автоматизированная система управления жесткостью подвески автомобиля».*

Утверждена приказом по университету от «16» апреля 2020 г, № 135-Т

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К ВЫПУСКНОЙ РАБОТЕ.

2.1. Состав объекта: *АСУ жесткостью подвески автомобиля на базе логического контроллера, 4 исполнительных элемента, интегрированных в конструкцию амортизаторов переменной жесткости, соответствующие драйверы, 3 акселерометра, 4 датчика перемещения и 2 лазерных дальномера, кнопка выбора режима подвески, индикатор текущего режима, система определения скорости автомобиля.*

2.2 Назначение и выполняемые функции: *логический контроллер осуществляет непрерывный сбор информации с датчиков, и на её основании определяет: состояние движущегося автомобиля (поворот налево, поворот направо, разгон, торможение прямолинейное движение), положение подвески, качество дорожного полотна и величину неровностей, силы, действующие на элементы подвески; управляет жесткостью каждого из четырёх амортизаторов посредством изменения управляющего электрического сигнала, подаваемого на соответствующие исполнительные элементы.*

2.3. Технические требования:

2.3.1 к управляющему устройству: *питание от сети постоянного тока 12В±15%; потребляемая мощность до 10 Вт; выходной сигнал с ШИМ;*

2.3.2 *время срабатывания исполнительного элемента не более 20мс, потребляемая мощность исполнительного элемента до 50Вт; возможность независимого управления каждым амортизатором;*

2.3.3 *ход подвески до 100мм, клиренс автомобиля не менее 100мм;*

2.3.4 *наличие в системе не менее одного трехосного гироскопа;*

2.4. Условия эксплуатации:

2.4.1 для управляющего устройства: температура окружающей среды $-40...+65^{\circ}\text{C}$, влажность $40...80\%$, вибрации частотой $20-120$ Гц, с перегрузкой $5g$, удары с перегрузкой $10g$. Класс защиты IP20;

2.4.2 для датчиков: температура окружающей среды $-40...+125^{\circ}\text{C}$, влажность до 100% , вибрации частотой $20-120$ Гц, с перегрузкой $5g$, удары с перегрузкой $10g$. Класс защиты IP67;

3 СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

3.1 Основная часть

- 1) Литературно-патентный обзор существующих систем автоматического управления жесткостью подвески автомобиля;
- 2) Разработка структурной схемы автоматизированной системы управления;
- 3) Выбор и обоснование элементной базы АСУ: контроллера, исполнительных органов, датчиков, линий связи;
- 4) Разработка электрической принципиальной схемы автоматизированной системы управления;
- 5) Разработка алгоритма работы АСУ;
- 6) Разработка программного обеспечения для контроллера;
- 7) Моделирование системы.

4 ПЕРЕЧЕНЬ ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

- 1) Структурная схема АСУ – 1 л. А4;
- 2) Принципиальная электрическая схема АСУ – 1 л. А3;
- 3) Перечень элементов электрической схемы АСУ – 2 л. А4;
- 4) Алгоритм работы АСУ – 4 л. А4;
- 5) Листинг программы для контроллера – 6 л. А4;

Срок представления на кафедру законченной работы: « 14 » июня 2020 г.

Задание выдал « 30 » мая 2020 г.

Задание принял « 30 » мая 2020 г.

Руководитель _____ /Ю.А.Федотов/
(личная подпись)

Студент Аз - /М.Э. Азизов/
(личная подпись)

Согласовано

Руководитель цикла

д.т.н. профессор _____ /Матюнин С. А./
(личная подпись)

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 98 с, 2 таблицы, 41 рисунок, 31 источник, 6 приложений.

Графическая часть: 1 лист формата А3, 13 листов формата А4.

АДАПТИВНАЯ ПОДВЕСКА, РЕГУЛИРУЕМАЯ ПОДВЕСКА, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, ИЗМЕНЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ АМОРТИЗАТОРА, ЭЛЕКТРОКЛАПАНЫ, АКСЕЛЕРОМЕТРЫ, ЛАЗЕРНЫЕ ДАЛЬНОМЕРЫ, КАЧЕСТВО ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ, ДОРОЖНЫЕ НЕРОВНОСТИ, КОМФОРТНОЕ ВОЖДЕНИЕ.

Объектом разработки является система управления жесткостью подвески автомобиля.

Целью работы является разработка автоматизированной системы управления жесткостью подвески автомобиля, разработка программы для контроллера, управляющего системой, а также разработка модели системы в программном пакете Amesim.

В ходе работы исследованы существующие системы адаптивной подвески, а также способы управления жесткостью и устойчивостью автомобиля при движении; разработана собственная система регулировки жесткости подвески автомобиля, с учётом недостатков уже имеющихся систем; выбрана элементная база и создана структурная и электрическая принципиальная схемы; разработан алгоритм работы системы при различных ситуациях во время движения автомобиля; разработано программное обеспечение для контроллера, управляющего системой, а также проведено моделирование системы управления в программном пакете Amesim.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 Литературно-патентный обзор существующих систем автоматического управления жесткостью подвески автомобиля	9
1.1 Общие сведения о подвеске автомобиля. Виды подвески	9
1.2 Адаптивные подвески	14
1.2.1 Существующие системы адаптивных подвесок и их элементы	14
1.2.2 Основные методы управления, применяемые в системах адаптивных подвесок.....	21
1.3 Патентный обзор	28
2 Описание объекта и разработка структурной схемы	34
3 Выбор и обоснование элементной базы.....	36
3.1 Датчики клиренса.....	36
3.2 Акселерометры.....	37
3.3 Лазерные дальнометры.....	39
3.4 Датчик скорости	41
3.5 Кнопка переключения режимов	42
3.6 Индикатор текущего режима.....	42
3.7 Исполнительные элементы.....	43
3.8 Драйверы для управления исполнительными элементами	45
3.9 Контроллер	46
4 Принципиальная схема системы	48
4.1 Подключение датчиков клиренса.....	48
4.2 Подключение акселерометров.....	48
4.3 Подключение лазерных дальнометров	49
4.4 Подключение датчика скорости	50
4.5 Подключение кнопки переключения режимов.....	50
4.6 Подключение светодиодного индикатора	51
4.7 Подключение драйверов	51
4.8 Подключение исполнительных устройств.....	52
5 Алгоритм работы системы.....	53

6	Разработка программного обеспечения для управляющего устройства	58
7	Моделирование системы в программном пакете Amesim	59
7.1	Построение системы	59
7.2	Экспериментальная часть	61
7.2.1	Исследование характеристик системы при разных диапазонах изменения коэффициента демпфирования	62
7.2.2	Исследование характеристик системы при разных частотах возмущающего воздействия	66
7.2.3	Исследование характеристик системы при подаче трапецеидального возмущения различной амплитуды.....	70
7.3	Анализ результатов испытаний модели	74
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	79
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	83
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	87
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	88
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	89
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д	93

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент почти в каждой семье есть личный автомобиль. Зачастую наиболее весомым критерием его выбора является комфорт и безопасность при вождении, которые, в свою очередь, обеспечиваются в значительной степени за счёт элементов подвески. Из открытых источников [1], [2] известно, что на её разработку и тестирование автопроизводители выделяют большое количество ресурсов, как материальных, так и человеческих.

Развитие упруго-демпферных систем автомобиля началось с самого появления автомобиля, а исследования в этой области ведутся и по сей день [3], [4]. Сегодня автопроизводители всё чаще прибегают к замене классической пассивной подвески на регулируемую или, в отдельных случаях, на активную подвеску. Последняя позволяет изменять характеристики жесткости непосредственно во время движения автомобиля, что значительно улучшает комфорт и безопасность при вождении, а также, при правильном использовании и настройке, значительно снижает нагрузки на раму автомобиля и элементы самой подвески, что впоследствии приводит к увеличению срока её безотказной работы.

На данный момент существует множество систем адаптивной подвески от известных автопроизводителей, которыми они оснащают свои автомобили (DCC от компании Volkswagen, ADS от компании Mercedes-Benz, AVS от компании Toyota, Magnetic Ride от компании Audi и др.). Все эти системы применяются исключительно в автомобилях премиум сегмента, что обусловлено высокой стоимостью данных систем. Однако, потребность в подобных системах есть и для автомобилей низко- и средне-ценовой категорий. Также нужно отметить, что в открытой печати отсутствует подробная информация о таких системах, из-за чего крайне трудно найти их техническое описание. В связи с этим, разработка аналогичной, однако более

доступной или же эффективной системы адаптивной подвески является на сегодняшний день актуальной задачей.

Целью работы является разработка автоматизированной системы управления жесткостью подвески автомобиля.

Для достижения поставленной цели необходимо будет решить ряд задач, а именно:

- провести литературно-патентный обзор;
- разработать структурную схему системы;
- разработать алгоритм работы системы;
- выбрать элементную базу;
- разработать принципиальную электрическую схему;
- разработать программу для управляющего устройства;
- произвести моделирование системы.

Разрабатываемая автоматизированная система должна будет обеспечивать все основные функции аналогичных систем: уменьшение крена корпуса автомобиля при разгоне - торможении или же повороте влево - вправо; снижение шума и вибраций, передающихся в салон автомобиля при езде путём независимого управления жесткостью каждого амортизатора; настройка жесткости подвески под определённый режим, выбираемый водителем; отображение текущего режима; изменение характеристик подвески в зависимости от скорости движения. При этом сама система должна обеспечивать управление подвеской в широком диапазоне скоростей и быть как можно проще, что положительно скажется на её стоимости, надежности и ремонтпригодности.

1 Литературно-патентный обзор существующих систем автоматического управления жесткостью подвески автомобиля

1.1 Общие сведения о подвеске автомобиля. Виды подвески

Подвеска представляет собой совокупность деталей, узлов и механизмов, которые связывают корпус автомобиля с опорными элементами (колёсами, катками, лыжами и т. д.). Она предназначена для снижения уровня динамических нагрузок, а также для более равномерного распределения их на опорные элементы при движении. Современные подвески являются очень сложными системами, включающими в себя механические, пневматические, гидравлические, электрические элементы [5]. Также они могут содержать электронные блоки управления, отрабатывающие конкретную программу управления. Все это позволяет обеспечить высокие характеристики управляемости, устойчивости, комфортабельности и безопасности при движении автомобиля.

При описании самой подвески и её элементов будем использовать понятия подрессоренных и неподрессоренных масс или частей. Подрессоренными массами или частями будем считать агрегаты, узлы и компоненты, сила тяжести которых воспринимается подвеской. Неподрессоренными массами или частями – агрегаты, узлы и компоненты, сила тяжести которых не воспринимается подвеской, т.е. колеса, мосты.

В состав всех современных автомобильных подвесок обязательно входят следующие четыре элемента [6]:

- упругий элемент;
- направляющий элемент;
- диссипативный (гасящий) элемент;
- стабилизирующий элемент.

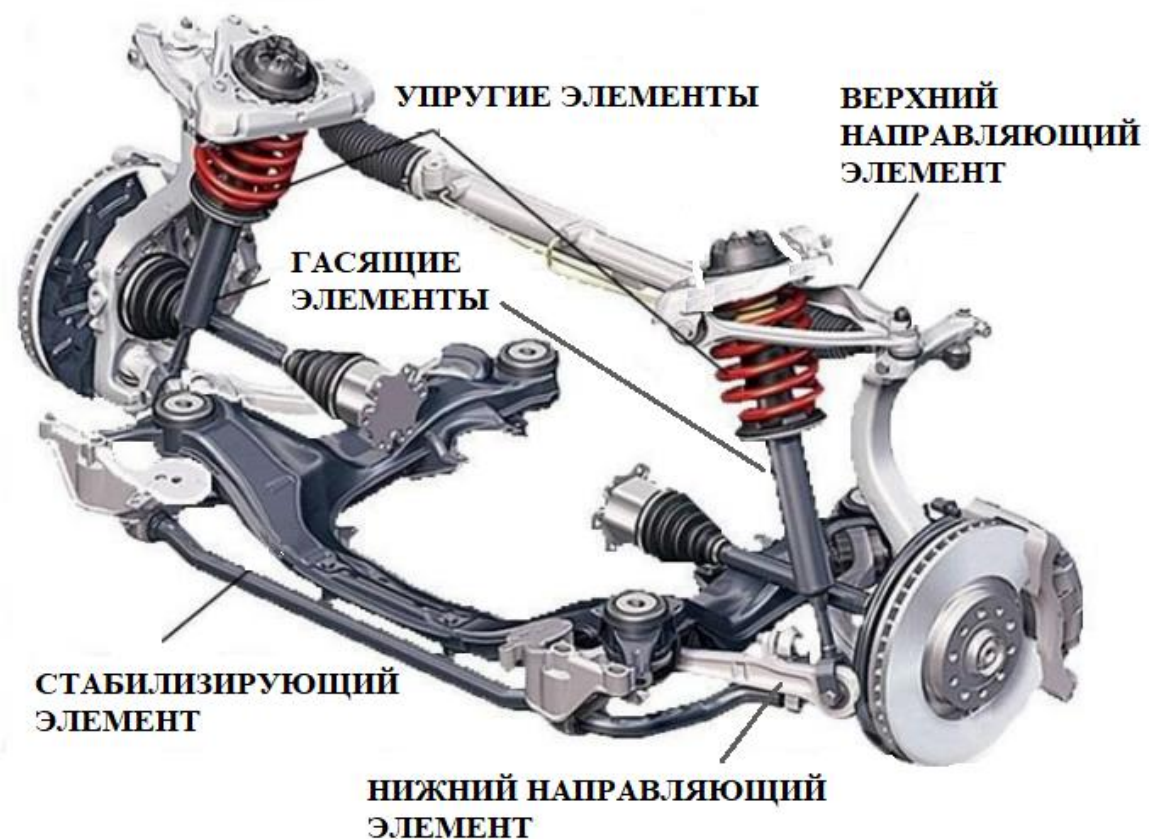


Рисунок 1 – Типовая схема устройства подвески автомобиля

Рассмотрим назначение каждого из элементов более подробно [7].

Упругий элемент – это устройство для накопления энергии. Зачастую в качестве такого элемента применяются пружины. Когда происходит её деформация, пружина поглощает подводимую энергию. Затем, когда нагрузка снимается, пружина использует эту энергию для возврата к своей первоначальной конфигурации. В автомобильной подвеске обычно это свойство пружины используют для сглаживания неровностей рельефа, которые приводят к перемещению корпуса автомобиля. Зачастую на практике поведение пружины при небольших деформациях описывается линейным законом Гука:

$$F = k_{\text{пр}} * \Delta x,$$

где F – сила, с которой действуют на пружину;

$k_{\text{пр}}$ – жесткость пружины;

Δx – деформация пружины.

Однако при больших деформациях этот закон будет несправедлив. И, например, если при нагрузке в 100 кг пружина сожмётся на 1 см, то при нагрузке в 300 кг она сожмется не на 3 см, а на 2,5 см, что говорит о нелинейности характеристик жесткости пружины. Такое поведение может быть чрезвычайно полезным для применения в автомобильной подвеске, особенно в ситуациях, когда существует большая разница между самыми высокими и самыми низкими нагрузками, с которыми придется столкнуться подвесной системе.

Направляющий элемент – это компонент подвесной системы, обеспечивающий её соединение с кузовом и передачу преимущественно боковых, а также продольных сил и моментов на кузов автомобиля. Как правило, в современные конструкции подвесок входит целая совокупность направляющих элементов, которые и определяют характер перемещения колес относительно кузова автомобиля. В качестве направляющих элементов используются всевозможные рычаги: продольные, поперечные, сдвоенные и т.д. В некоторых видах подвески роль направляющего элемента могут играть упругие и диссипативные элементы. Самое главное качество, которым должен обладать любой направляющий элемент – это жесткость, которая будет исключать любые нежелательные движения подвески.

Диссипативный элемент – это устройство для замедления (демпфирования) движения подвесной системы и устранения колебаний в ней. В качестве такого элемента в автомобиле применяются амортизаторы. Эти устройства очень сильно влияют на динамические характеристики подвески. Они не дают машине бесконтрольно подпрыгивать при каждом ударе. Приложенная к подвеске нагрузка перемещает ее на определенную величину (определяемую жесткостью пружины), независимо от того,

насколько сильное демпфирование присутствует в системе – амортизатор определяет лишь то, насколько быстро будет происходить это перемещение под нагрузкой, а также как быстро подвеска вернется в своё изначальное положение при снятии нагрузки.

Амортизаторы ограничивают скорость движения подвески, а также гасят колебания колес, превращая кинетическую энергию движения подвески в тепловую и тем самым обеспечивая комфортную езду. Ограничение скорости перемещения подвески положительно сказывается на безопасности вождения в целом, потому что это помогает держать протектор шин в постоянном контакте с дорожным покрытием, что увеличивает срок службы шин, тягу, улучшает рулевое управление и курсовую устойчивость автомобиля. Если же амортизаторы изношены, то колебания колес, которые возникают при движении по неровному дорожному покрытию, гасятся слабо и передаются в виде вибраций на кузов и другие элементы автомобиля, что снижает их ресурс, негативно сказывается на ощущениях от езды в салоне автомобиля, а также может привести к потере сцепления с дорогой, а значит и потере контроля над автомобилем.

Стабилизирующий элемент – это устройство, которое распределяет нагрузку на подвеску при выполнении маневров вроде поворотов. В качестве таких устройств в автомобилях применяют стабилизаторы поперечной устойчивости в виде металлических торсионных стержней. Они используются в совокупности со стойками, которые представляют собой устройство, включающее амортизатор и упругий элемент и зачастую выступающее в качестве направляющего элемента, чтобы придать движущемуся автомобилю дополнительную устойчивость в поперечном направлении. Стабилизатор поперечной устойчивости соединяет две стороны подвески. Когда подвеска на одном колесе перемещается вверх или вниз, стабилизатор поперечной устойчивости передает это движение другому колесу, что обеспечивает более ровную езду и уменьшает колебания

автомобиля. В частности, он борется с креном автомобиля на поворотах. По этой причине своей простоты и эффективности почти все автомобили сегодня оснащены данными стабилизаторами.

Рассмотренные элементы имеют различные варианты исполнения, обусловленные областью применения подвесной системы (грузовой или легковой транспорт; спортивные или городские автомобили; автомобили средней ценовой категории или премиум-сегмент и т.п.).

Несмотря на наличие каждого из этих элементов в подвесной системе автомобиля, сама конструкция подвески имеет очень много вариантов исполнения. Зачастую даже подвеска передней и задней осей автомобиля значительно отличаются друг от друга. Для более подробного представления существующих видов подвесных систем воспользуемся классификацией представленной на рисунке 2 [8].

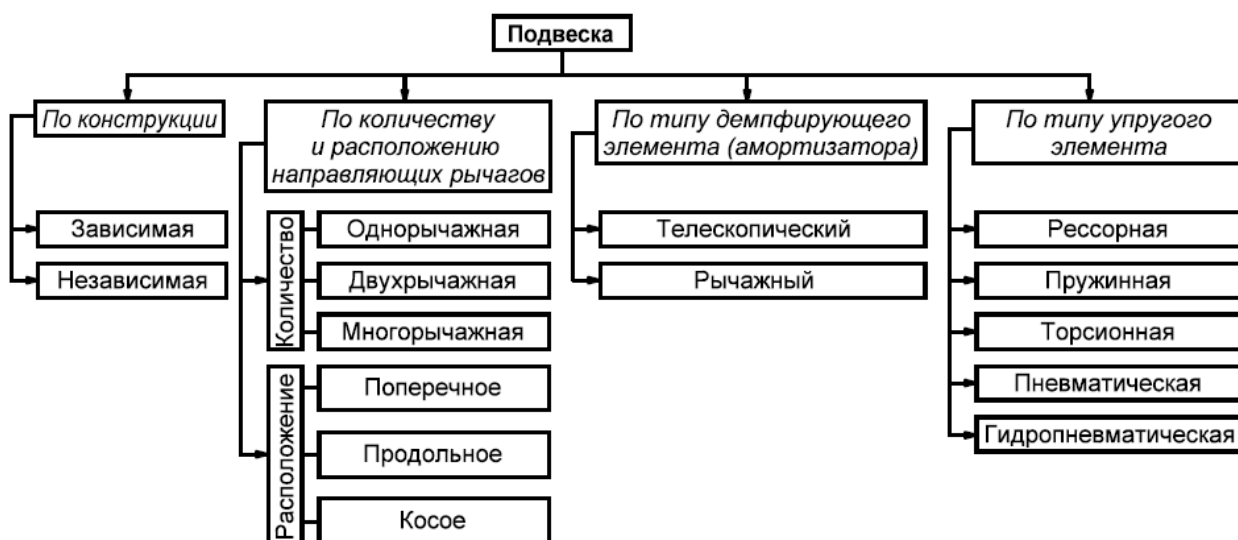


Рисунок 2 – Классификация подвесных систем

Данная классификация предусматривает лишь конструкционное и элементное определение типов подвесных систем. В дополнение нужно отметить, что подвески также различаются по степени контролируемости

состояния: активные, полуактивные и пассивные. К активным относятся подвески, в которых возможна регулировка жесткости амортизаторов, дорожного просвета, жесткости стабилизатора поперечной устойчивости. Управление такой подвеской может быть как полностью автоматическим и зависеть только от внешних условий во время езды, так и с возможностью ручного контроля. Как подвид активных подвесок, отдельно выделяют адаптивные подвески, которые сами подстраиваются под условия езды. К полуактивным относят подвески, которые позволяют лишь корректировать высоту дорожного просвета. Пассивные (неактивные) – это обычные подвески, выполняющие свои функции с неизменяющимися характеристиками жесткости и величиной дорожного просвета.

В данной работе речь будет идти о разработке автоматизированной системы управления адаптивной подвеской, в которой возможна регулировка жесткости амортизаторов.

1.2 Адаптивные подвески

1.2.1 Существующие системы адаптивных подвесок и их элементы

Как отмечалось ранее, адаптивная подвеска позволяет изменять жесткость амортизаторов, которые присутствуют в её составе. Изменение это может происходить ступенчато (переключение между определенными значениями жесткости) либо бесступенчато, а также независимо для каждого колеса либо для каждой оси автомобиля. Таким образом, главным элементом любой адаптивной подвески является именно амортизатор с возможностью регулирования его жесткости. По сравнению с обычными амортизаторами, которые имеют постоянную рабочую характеристику, регулируемые амортизаторы позволяют реализовать диапазон рабочих характеристик. На рисунке 3 цифрами обозначены следующие элементы: 1 – верхний предел диапазона регулирования адаптивного амортизатора, 2 – нижний предел

диапазона регулирования адаптивного амортизатора, 3 – диапазон регулирования адаптивного амортизатора, 4 – рабочая характеристика пассивного амортизатора.

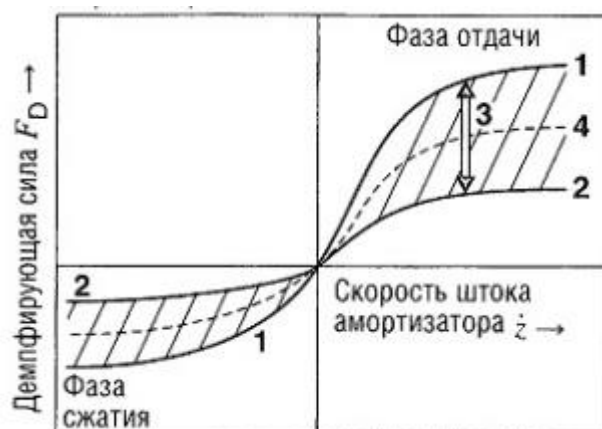


Рисунок 3 – Рабочие характеристики амортизаторов

Автопроизводители и производители компонентов подвесных систем с середины прошлого столетия ведут разработку подобных устройств. Одна из первых конструкций адаптивных амортизаторов с возможностью ступенчатого изменения рабочих характеристик была разработана компанией Delco Products [9]. Исполнительным устройством был сервопривод, помещенный внутрь штока амортизатора. Он использовался для поворота элемента с нанесенными отверстиями различного диаметра. Таким образом, изменялся поток амортизаторной жидкости и, следовательно, рабочие характеристики амортизатора. Изменяя конфигурацию отверстий в управляющем элементе, можно было получить необходимый набор рабочих характеристик амортизатора. Аналогичное исполнение регулируемого амортизатора было предложено компанией Koni для автомобиля Volkswagen Golf GTI [10]. Однако подобное решение привело к снижению прочностных свойств штока. В связи с этим компания Bilstein предложила установить сервопривод в верхней части штока [9]. Данный амортизатор имел восемь настроенных заранее рабочих характеристик, между которыми мог переключаться сам водитель вручную и свое применение он нашёл в

автомобиле Porsche 959. Время переключения между рабочими характеристиками для рассмотренных выше амортизаторов составляло от 50 до 100 мс, что, конечно же, не позволяло эффективно их использовать для активного демпфирования во время движения. Однако, амортизатор Fitchel and Sachs имел подобную конструкцию и три настройки жесткости, при этом время его переключения между заданными режимами было всего 30 мс [10].

Помимо серводвигателей, в начале развития адаптивных подвесок, в конструкции амортизаторов применялись магнитные клапаны [9]. Такой клапан мог быть размещен внутри поршня или на главном цилиндре амортизатора. Основные преимущества использования клапанов по сравнению с сервоприводами – это меньшее энергопотребление и меньшее время переключения (около 10 мс по данным источника [11]). Кроме того, расположение клапана на главном цилиндре амортизатора (снаружи) позволяло сохранить высокие прочностные качества штока. Амортизаторы с подобными клапанами применялись, например, фирмой Voge для BMW M3 [10]. В данных амортизаторах было два внешних клапана, которые позволяли реализовывать три рабочие характеристики (рисунок 4). Еще один регулируемый амортизатор был впервые представлен в 1987 году компанией Adolf Schilling AG в сотрудничестве с Voge и VDO в составе системы Electrical Damping Control (EDC) [10]. Данная система впервые была использована для автомобилей BMW 6 серии.

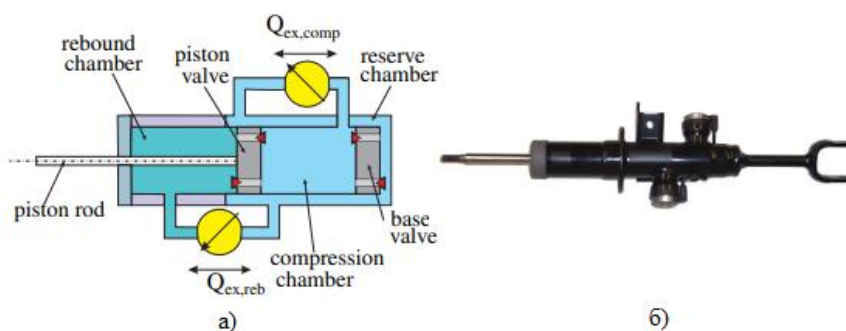


Рисунок 4 – Адаптивный амортизатор с двумя клапанами: а) – схема внутреннего устройства амортизатора; б) – его внешний вид

Следующим шагом в развитии адаптивных амортизаторов стало появление амортизаторов с возможностью бесступенчатого изменения рабочих характеристик. Одной из первых такие амортизаторы разработала компания ZF Sachs и применила их в своей системе Continuous Damping Control (CDC). В соответствии с работой [12], существует два возможных варианта размещения клапанов в адаптивных амортизаторах от компании ZF Sachs: внутри рабочего цилиндра и снаружи. В случае внутреннего размещения стандартные нерегулируемые клапаны амортизатора заменяются на управляемые. При внешнем размещении клапаны регулируют поток амортизаторной жидкости вне основных камер (используются дополнительные камеры). Амортизаторы CDC в вариантах исполнения с внутренним и внешним клапанами представлены на рисунке 5.

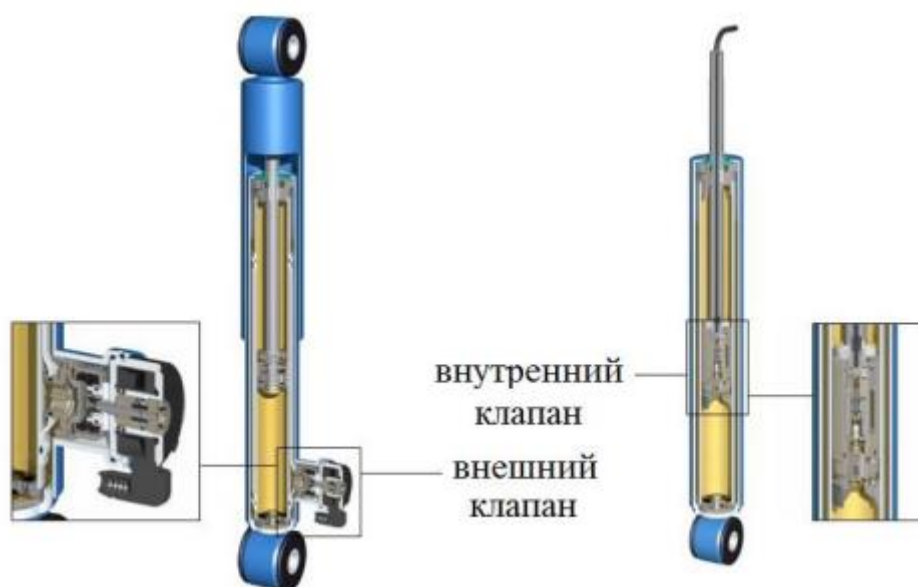


Рисунок 5 – Амортизаторы CDC

Дальнейшие разработки амортизаторов с электромагнитными клапанами для адаптивных подвесок велись уже более известными компаниями на рынке автомобилестроения и были направлены на совершенствование существующих конструкций. Значительным

преимуществом таких амортизаторов являлась и по сей день является их невысокая стоимость. Это позволило применять их в массовом производстве.

Также стоит уделить внимание сравнительно новым адаптивным амортизаторам, в которых регулирование рабочих характеристик осуществляется путем изменения свойств амортизаторной жидкости. В качестве такой жидкости производители применяют магнитно-реологическую жидкость, состоящую из синтетического масла и мельчайших (3-10 мкм) частиц металла [13]. При попадании в магнитное поле магнитные частицы выравниваются по направлению линий магнитного поля. При этом изменяется и вязкость протекающей жидкости. Принцип работы амортизатора с использованием подобной технологии представлен на рисунке 6. Подобного рода амортизаторы примерно в 4 раза дороже обычных нерегулируемых амортизаторов [14].

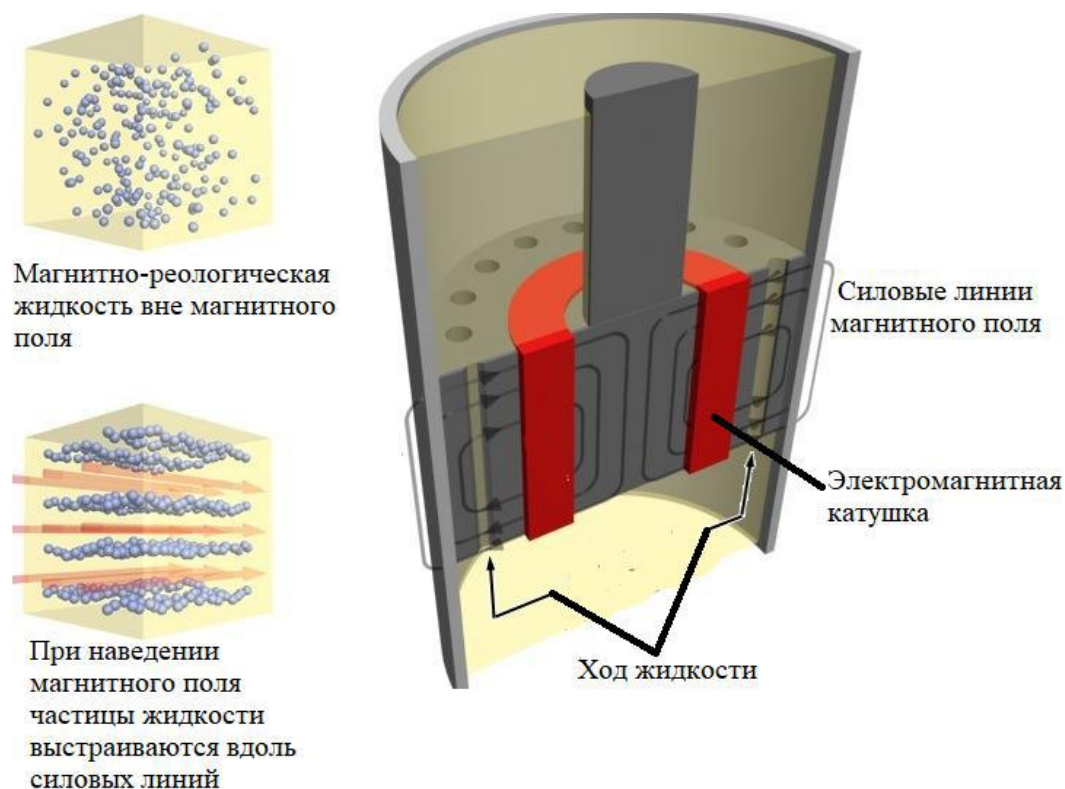


Рисунок 6 – Принцип работы амортизатора с магнитно-реологической жидкостью

Таким образом, на сегодняшний день существует два основных типа регулирования демпфирующих устройств:

- с помощью электромагнитных клапанов;
- с помощью магнитно-реологической жидкости.

Амортизаторы с электромагнитными клапанами используются в конструкции следующих адаптивных подвесок [15]:

- Adaptive Chassis Control (DCC) от компании Volkswagen;
- Adaptive Damping System (ADS) от компании Mercedes-Benz (в составе пневматической подвески Airmatic Dual Control);
- Adaptive Variable Suspension (AVS) от компании Toyota;
- Continuous Damping Control (CDS) от компании Opel;
- Electronic Damper Control (EDC) от компании BMW (в составе активной подвески Adaptive Drive);
- Porsche Active Suspension Management (PASM) от компании Porsche.

Амортизаторы, регулирование жесткости которых происходит путём изменения свойств магнитно-реологической жидкости, используются в конструкции следующих адаптивных подвесок:

- MagneRide от General Motors (автомобили Cadillac, Chevrolet);
- Magnetic Ride от Audi.

Все выше перечисленные системы изменяют жесткость амортизаторов посредством электрических сигналов управления от блока управления, регулирующего демпфирование каждого колеса в соответствии с разработанным фирмой-изготовителем алгоритмом. Для расчёта управляющего воздействия управляющим устройством собираются исходные данные с датчиков и других систем автомобиля. Проанализировав информацию из источников [13], [15], [16], [17], [18], можно выявить

следующие обязательные элементы каждой системы управления адаптивной подвески:

- акселерометр (или несколько акселерометров, расположенных в разных частях автомобиля);
- датчики перемещения подвески (или датчики дорожного просвета);
- датчик температуры окружающей среды (или же данные о температуре поступают из других систем автомобиля);
- датчик скорости автомобиля (или же данные о скорости поступают из других систем автомобиля);
- одна или несколько кнопок управления режимами подвески.

Также система управления адаптивной подвеской может иметь дополнительные датчики и получить другие данные от систем автомобиля, например, от системы ABS [16].

Стоит отметить, что датчики температуры используются преимущественно в системах адаптивной подвески с магнито-реологическими амортизаторами, где существенное влияние на жесткость оказывает вязкость рабочей жидкости. В амортизаторах же с электромагнитными клапанами, где в качестве рабочей жидкости используется амортизаторное масло, влияние вязкости значительно снижено, в силу использования специальной конструкции перепускных клапанов, которая также используется в современных пассивных амортизаторах. По результатам исследований [19] изменение жесткости многих амортизаторов не превышает 4-5% при изменении температуры от 20 до 80 °С, что соответствует нормальному режиму езды. При экстремальных же условиях эксплуатации температура может достигать 120-130 °С и в этом случае изменения составляют примерно 15%.

1.2.2 Основные методы управления, применяемые в системах адаптивных подвесок

Цель любой системы управления адаптивной подвеской – это вычисление по определенному алгоритму (с помощью определенного метода) воздействий, которое необходимо подать на исполнительные элементы для обеспечения наиболее комфортного и безопасного вождения. Зачастую, используя типовую конструкцию подвески и меняя лишь закон управления, можно добиться существенного прироста производительности и эффективности работы системы в целом.

В работе [10] и в статьях [20], [21] приведены следующие основные методы управления адаптивной подвеской:

- метод пороговых значений;
- Skyhook;
- Groundhook;
- Linear–quadratic regulator (LQR).

Далее на основании данных из источников [10], [20], [21], [22], [23] опишем перечисленные методы более подробно.

Управляющие устройства, использующие метод пороговых значений сравнивают реальные значения каких-либо измеряемых или вычисляемых параметров движения (например, ускорение кузова, скорость хода подвески) с соответствующими пороговыми значениями и при их превышении или же не достижении, управляющие устройства инициируют определенные меры. Обычно при этом изменяется жесткость нескольких амортизаторов (амортизаторы на одной оси или на всех осях), как на сжатие, так и на отбой. Основной задачей данных систем является повышение комфорта при одновременном сохранении безопасности движения. Наряду с влиянием только на характеристики вертикальной вибрации можно также

оптимизировать индуцированные движения подрессоренных масс путём контроля соответствующих органов управления. Например, контроль угла поворота рулевого колеса может применяться для уменьшения динамического качания кузова или контроль силы давления на педаль тормоза может быть использован для повышения жесткости передних амортизаторов, что в свою очередь уменьшит наклон автомобиля при торможении.

Метод управления Skyhook (англ., «подвешенный к небу») был запатентован в 1974 году Карноппом. Данный метод главным образом направлен на сохранение неподвижного положения подрессоренных частей автомобиля в вертикальной плоскости независимо от текущих параметров дорожного покрытия. Он предназначен в первую очередь для повышения комфорта при вождении. В отличие от метода пороговых значений, Skyhook позволяет изменять характеристики каждого из амортизаторов по отдельности. Для изолирования кузова автомобиля от внешних колебаний мысленно представляют, что он соединен амортизатором с небом или воображаемой инерциальной системой отсчёта в виде горизонтальной линии (рисунок 7).

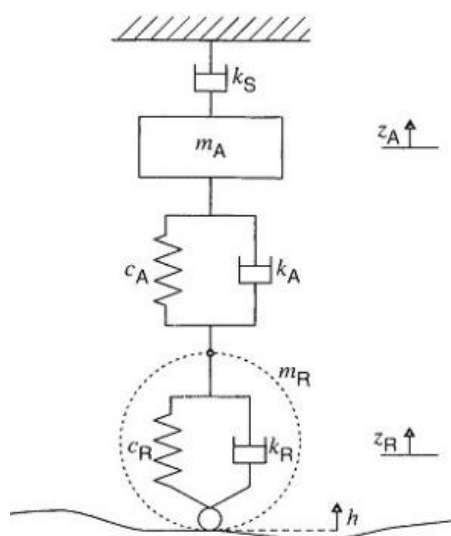


Рисунок 7 – Теоретический принцип метода Skyhook

Усилие F_{DS} такого амортизатора определяется вертикальной скоростью подрессоренных масс \dot{z}_A и постоянной демпфирования k_S :

$$F_{DS} = k_S * \dot{z}_A \quad (1)$$

При этом для традиционной подвесной системы автомобиля, усилие кузовного амортизатора F_D будет определяться его постоянной демпфирования k_A и разностью вертикальных скоростей подрессоренных \dot{z}_A и неподрессоренных \dot{z}_R масс:

$$F_D = k_A * (\dot{z}_A - \dot{z}_R) \quad (2)$$

Чтобы «прикрепить» кузов к инерциальной системе отсчета в реальности, кузовной амортизатор должен прикладывать дополнительное усилия F_{DS} , которое было бы приложено к кузову воображаемым амортизатором, соединенным с небом. В этом случае, нужный коэффициент демпфирования k_{AS} находится по формуле:

$$k_{AS} = \frac{k_S * \dot{z}_A}{(\dot{z}_A - \dot{z}_R)} \quad (3)$$

Поскольку регулируемый амортизатор способен лишь преобразовывать кинетическую энергию в тепловую, но не способен вносить кинетическую энергию в систему, используя выражения (1), (2) и (3), получаем следующую систему уравнений для силы реального адаптивного амортизатора:

$$F_{DR} = \begin{cases} \left(\frac{k_S * \dot{z}_A}{(\dot{z}_A - \dot{z}_R)} + k_A \right) * (\dot{z}_A - \dot{z}_R), & \text{если } \dot{z}_A * (\dot{z}_A - \dot{z}_R) \geq 0 \\ k_A * (\dot{z}_A - \dot{z}_R), & \text{если } \dot{z}_A * (\dot{z}_A - \dot{z}_R) < 0 \end{cases}$$

В зависимости от величины и направления скорости движения кузова и состояния амортизатора (сжатие или отбой), метод Skyhook для обеспечения наиболее комфортной подвески подразумевает управление в соответствии со схемой, представленной на рисунке 8.



Рисунок 8 – Схема управления для метода Skyhook

Из схемы видно, что процесс регулирования жесткости целесообразен только в первом и третьем квадрантах, что обусловлено именно неспособностью демпфирующего устройства вносить энергию в систему. Конструкции подвесок, включающие устройства, способные добавлять энергию в систему называются активными и способны работать во всех четырех квадрантах.

Стоит отметить, что по информации из источника [10], почти все перечисленные системы адаптивной подвески от известных автопроизводителей используют в качестве метода управления Skyhook или его модификацию. Таким образом, на сегодняшний день этот метод является наиболее распространенным для систем управления адаптивной подвеской автомобиля. Однако он направлен исключительно на снижение вибраций, передаваемых поддрессоренным частям от недрессоренных и никак не учитывает поведение автомобиля при движении (крен на повороте, наклон вперед и назад при торможении и разгоне). А ведь это также имеет большое значение для комфорта и безопасности вождения. Данный аспект решается использованием систем, в которых алгоритм метода Skyhook дополняется другими алгоритмами, учитывающими поведение автомобиля.

Метод Groundhook (англ., «прицепленный к земле») отличается от метода Skyhook тем, что воображаемым амортизатором с инерциальной системой отсчета теперь связаны неподдресоренные части автомобиля и всё внимание смещается именно к ним (рисунок 9). Логика метода Groundhook схожа с логикой метода Skyhook. Сила воображаемого амортизатора в данном случае находится следующим образом:

$$F_{DG} = k_G * (\dot{z}_R - \dot{h}), \quad (4)$$

где k_G – постоянная демпфирования воображаемого амортизатора;

\dot{z}_R – вертикальная скорость неподдресоренных масс;

\dot{h} – вертикальная скорость точки касания неподдресоренных масс с дорожным полотном;

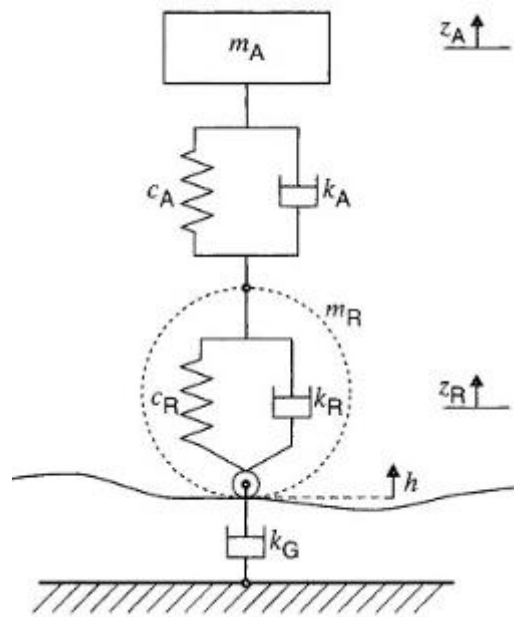


Рисунок 9 – Теоретический принцип метода Groundhook

По аналогии с формулой (3) выводится формула для коэффициента дополнительного демпфирования:

$$k_{AG} = \frac{k_G * (\dot{z}_R - \dot{h})}{(\dot{z}_R - \dot{z}_A)}, \quad (5)$$

где k_G – коэффициент демпфирования воображаемого амортизатора;
 \dot{z}_R – вертикальная скорость неподдресоренных масс;
 \dot{h} – вертикальная скорость точки касания неподдресоренных масс с дорожным полотном;
 \dot{z}_A – вертикальная скорость поддресоренных масс.

И также из-за неспособности адаптивного амортизатора сообщать кинетическую энергию частям подвесной системы составляется система уравнений с учетом формул (2), (4), (5) для описания нужной силы демпфирования кузовного амортизатора в различных условиях:

$$F_{DR} = \begin{cases} \left(\frac{k_G * (\dot{z}_R - \dot{h})}{(\dot{z}_R - \dot{z}_A)} + k_A \right) * (\dot{z}_R - \dot{z}_A), & \text{если } (\dot{z}_R - \dot{h}) * (\dot{z}_A - \dot{z}_R) \geq 0 \\ k_A * (\dot{z}_R - \dot{z}_A), & \text{если } (\dot{z}_R - \dot{h}) * (\dot{z}_A - \dot{z}_R) < 0 \end{cases}$$

На основании данной формулы, для метода Groundhook также составляется схема, подобная схеме для Skyhook, в соответствие с которой происходит управление жесткостью амортизатора исходя из направлений движения поддресоренных и неподдресоренных масс (рисунок 10).

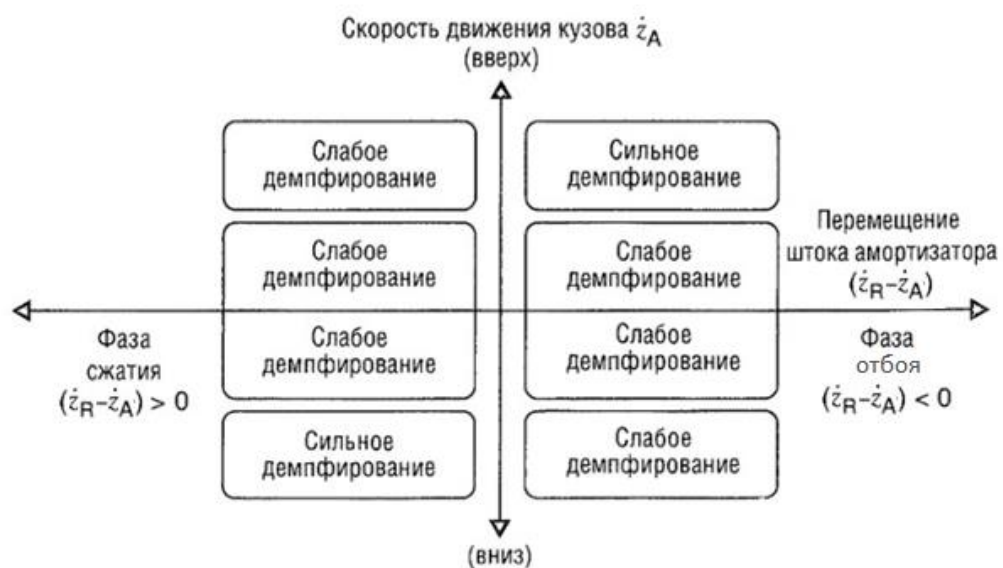


Рисунок 10 – Схема управления для метода Groundhook

Линейно-квадратичный регулятор (Linear–quadratic regulator, LQR) также используется как один из методов реализации управления в системах адаптивных подвесок. Этот метод часто применяется в различных исследованиях и представляет собой концепцию оптимального контроллера, который мог бы использоваться для всей системы в целом. В работе [10] такой регулятор используют при двух его настройках: одна из них направлена на реализацию как можно более комфортной езды, другая же ориентирована на безопасность. С помощью LQR подбирается оптимальная сила, необходимая для гашения колебаний. Вычисление оптимального значения для силы амортизатора производится с применением, так называемой, функции стоимости, которая минимизируется, после чего на неё накладываются ограничения (в виде максимально допустимой силы) и она обрезается так, чтобы полученные значения входили в рабочий диапазон демпфера. Здесь же учитывается невозможность внесения дополнительной энергии в адаптивную систему. Другими словами, расчет выполняется для активной подвески, и полученные значения применяются, с учетом ограничений, для адаптивной подвески. На рисунке 11 качественно отражена разница между найденной желаемой силой и той силой, которая в действительности может прикладываться с помощью амортизатора.

В работе [24] проводятся исследования по сравнению производительности и эффективности адаптивной системы с применением метода Skyhook и активной системы, основанной на методе LQR. В результате данных исследований делается вывод, что адаптивная система, имеющая в качестве исполнительного элемента регулируемый демпфер, путем выбора подходящих параметров, может быть доведена по производительности до полностью активной системы, имеющей генераторы силового воздействия.

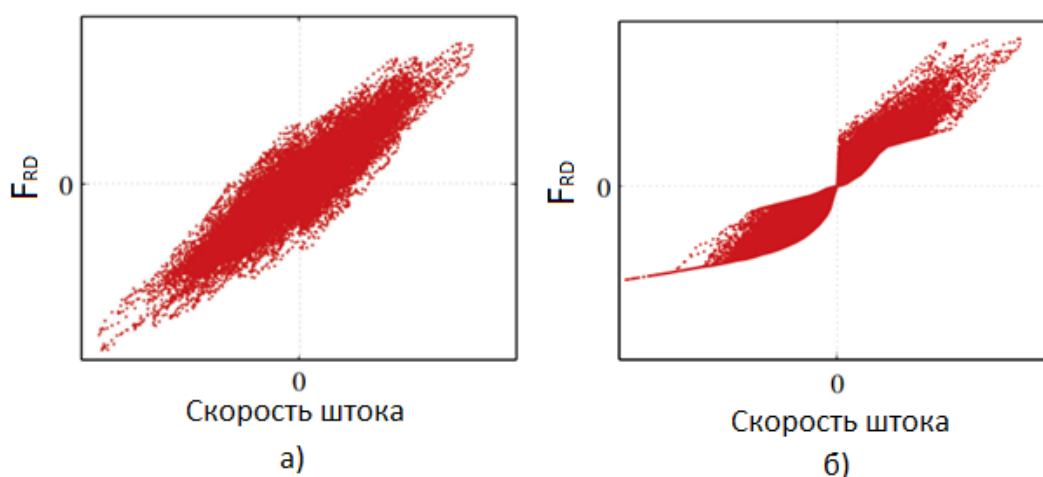


Рисунок 11 – Требуемые значения силы амортизатора для активной системы (а) и урезанные значения необходимой силы для адаптивной системы (б)

Таким образом, в результате литературного обзора, было определено следующее:

- в разрабатываемой системе будет использован амортизатор с электромагнитным клапаном в силу его более линейных характеристик при регулировании, меньшей стоимости и большей распространенности в современных автомобилях;
- в качестве датчиков будут использованы все основные выявленные измерительные устройства, используемые в подобных системах за исключением датчика температуры, так как она не оказывает сильного влияния на изменение характеристик демпфирования;
- в качестве метода управления демпфированием будет использован Skyhook, дополненный алгоритмами контроля скорости и поведения автомобиля на дороге (разгон/торможение, поворот влево/вправо), в силу его простоты и эффективности по сравнению с другими методами.

1.3 Патентный обзор

С целью исследования технического уровня и тенденций развития систем управления адаптивной подвеской автомобиля, был проведен

патентный обзор по теме «Системы управления адаптивной подвеской». Патентное исследование было проведено на глубину 30 лет по материалам фонда национального патентного ведомства ФИПС, а также Internet базы данных <http://www.google.com/patents>.

В результате поиска были найдены патенты, которые можно условно разделить 3 группы:

- 1) описывают полностью систему адаптивной подвески автомобиля;
- 2) описывают лишь отдельные элементы системы управления;
- 3) описывают методы управления.

К первой группе можно отнести следующие документы:

1. RU 2114745 C1, 10.07.1998. Один из самых ранних найденных документов. В нём описывается устройство гидравлического амортизатора – основного элемента подвески – с ферромагнитной жидкостью внутри и управляющими соленоидами в его верхней части, а также система, управляющая четырьмя такими элементами в составе подвески транспортного средства. Примечательным является отсутствие сенсорных датчиков, а также процессоров. Изменение жесткости происходит по мере движения штока амортизатора относительно соленоидов. Регулирование магнитного потока в амортизаторах осуществляется с помощью автотрансформатора на оси рулевого колеса, а также концевых выключателей на педалях газа и тормоза. Патент не действителен.

2. RU 2707483 C2, 03.02.2016 и RU 2718181 C2, 23.05.2016. Патентообладатель – Ford (US). Данные патенты описывают комплексную систему управления транспортным средством, включающую также и управление адаптивной подвеской. Примечательным здесь является то, что управление происходит с помощью одного устройства (контроллера) и водителю предоставляется возможность как ручного, так и автоматического

контроля для каждой из систем автомобиля (рулевой, подвесной, тормозной и т.п.). Управление подвеской осуществляется исходя из характеристик дорожного полотна и характера движения транспортного средства. Данные патенты действительны.

3. RU 2568163 C1, 13.05.2013 и RU 2568048 C1, 13.05.2013. Патентообладатель – Nissan (JP). Данные патенты описывают систему управления, в которой состояние подрессоренной массы оценивают на основе информации в предписанном частотном диапазоне скорости вращения колес. Другими словами, с увеличением вибраций снижается точность измерения хода подвески. Оба документа описывают систему управления и способ управления транспортным средством (его подсистемами), посредством которых можно управлять ориентацией кузова транспортного средства, даже когда понижается точность оценки состояния подрессоренной массы. Данные патенты действительны.

4. RU 2395407 C2, 06.03.2007, а также более поздние RU 2456170 C2, 08.05.2009 и RU 2493987 C2, 06.10.2009. Патентообладатель – Toyota (JP). Два Патента описывающих полностью систему активной подвески автомобиля, а также устройства, которые применяются для активного демпфирования. В состав этих систем входят: электромагнитный исполнительный механизм (двигатель постоянного тока), соединяющий механизм (стойка), контроллер, а также датчики. В работах также представлен алгоритм функционирования в виде блок-схем. Отличительной чертой является невысокое быстродействие системы, что не позволяет эффективно гасить колебания высокой частоты. Патенты действительны.

5. RU 2499687 C1, 11.04.2012. Патент Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина. В данном документе предлагается построение системы, адаптивной подвески без применения какой-либо управляющей аппаратуры. Регулирование степени демпфирования производится чисто

механически за счёт изменения геометрии конструкции подвески во время езды. Примечательным является то, что в роли упругого элемента предполагается использование торсионной балки, которая скручивается при относительном перемещении поддресоренных и неподдресоренных частей автомобиля. Патент не действителен.

Ко второй группе можно отнести следующие документы:

1. RU 2700290 C2, 29.07.2015. Патентообладатель – Hitachi (JP). В данном документе содержатся сведения о разработке адаптивного амортизатора, степень демпфирования которого будет изменяться как от управляющего электрического воздействия, так и от положения штока, с помощью специальной конструкции дросселирующей системы. Патент действителен.
2. RU 175044 U1, 29.08.2017. В данном документе описывается полезная модель адаптивного комбинированного реологического амортизатора. Принцип его работы основан на магнитореологическом и реологическом эффектах неньютоновских сред. Сам амортизатор включает в себя разделенные камеры с магнитореологической и дилатантной жидкостями. Это дает возможность оптимизировать работу амортизатора, управляя его жесткостью, а также улучшить процессы поглощения энергии в широком диапазоне частот и нагрузок. Действующий патент.
3. RU 2479766 C1, 12.09.2011 и RU 2474739 C1, 19.10.2011. Патенты Южно-Уральского государственного университета. В данных документах представлены конструкции адаптивных амортизаторов для транспортных средств. Обе конструкции используют в своём составе регулируемый электромагнитный клапан непрямого действия. Отличием от других конструкций является только способ расположения данного клапана. Оба патента не действуют.

К третьей группе можно отнести следующие документы:

1. JP5503328B2, 23.02.2010. В патенте описан способ управления адаптивной подвеской автомобиля, который предполагает отдельное оценивание необходимого управляющего воздействия для устранения вертикальных колебаний колеса, наклона кузова влево-вправо и вперёд-назад. После этого рассчитывается полная необходимая жесткость амортизатора. Также в данной работе учитывается влияние бокового сноса автомобиля на вираже и предполагается его уменьшение путём соответствующего управления подвеской автомобиля. Патент действителен.

2. RU 2497692 C2, 01.04.2009. Патентообладателем является GM (US). В данном документе содержатся алгоритмы (словесное описание и блок-схемы) управления для контроллера адаптивной подвески. Примечательным является описание необходимых режимов работы подвески при маневрировании для повышения безопасности. В частности описываются ситуации, когда водителем выбран режим «мягкой» подвески, а ситуация на дороге требует «жесткой» подвески или же наоборот. Патент прекратил своё действие 01.04.2018, но может быть восстановлен.

3. CN108891220A, 19.07.2018. В данном документе описывается усовершенствованный алгоритм управления адаптивной подвеской на основе теории Skyhook и метода LQR. В частности сам закон регулирования жесткости является линейным, однако подбор коэффициента демпфирования в различных случаях взаимного перемещения подрессоренной и неподдресоренной масс происходит путём оптимизации. В данном алгоритме (в отличие от классического) оценивается не только абсолютную скорость частей автомобиля, но и ускорение, которое применяется для расчёта оптимального коэффициента демпфирования в методе LQR. Патент действителен.

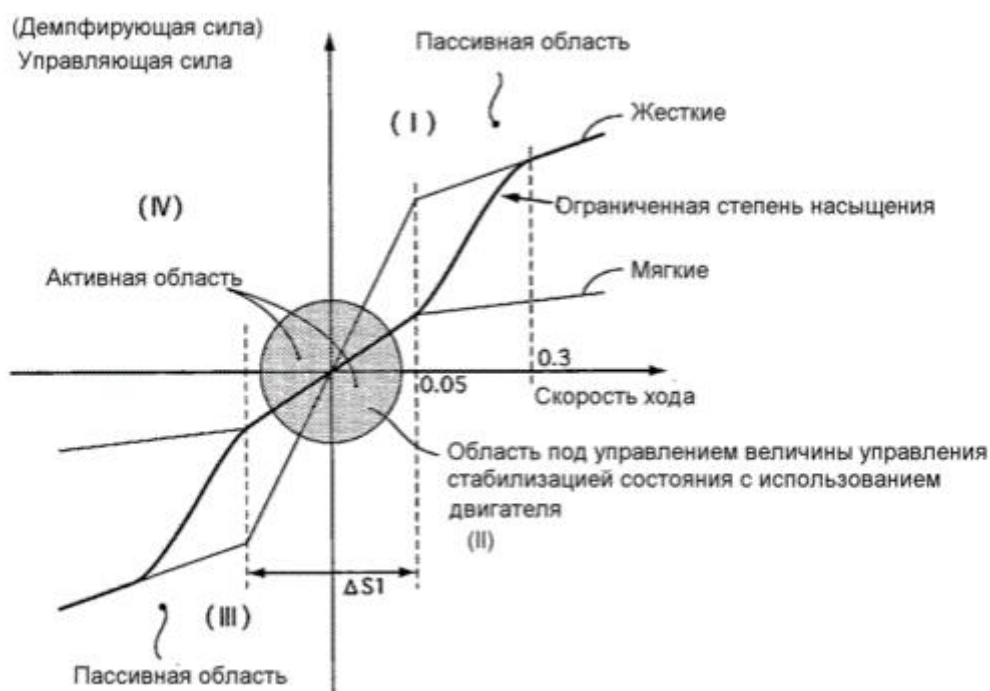


Рисунок 12 – Метод управления с ограничением жесткости амортизатора

4. RU 2575368 C1, 02.11.2012. Патентообладатель – Nissan (JP). В данном документе предлагается способ управления силой демпфирования амортизатора, который предполагает введение зоны ограничения насыщения. Для малых скоростей относительного перемещения штока (до заданного значения) линия ограничения совпадает с характеристической кривой «мягкой» подвески, а при увеличении скорости штока – ограничение стремится к кривой «жесткой» подвески (рисунок 12). Патент действителен.

В результате патентного обзора были выявлены основные направления развития систем управления адаптивных подвесок, а также уточнены состав проектируемой системы управления и метод расчёта управляющих воздействия. Сводная таблица по проведенному патентному обзору представлена в приложении А.

2 Описание объекта и разработка структурной схемы

Автоматизированная система управления жесткостью подвески автомобиля представляет собой систему, которая в режиме реального времени анализирует скорость, характер движения автомобиля, а также состояние дорожного полотна для независимого изменения характеристик демпфирования каждого амортизатора автомобиля с целью уменьшения колебаний подрессоренных масс, а также уменьшения углов наклона корпуса автомобиля.

В результате литературно-патентного обзора был окончательно определён состав проектируемой системы управления, а также составлена структурная схема (рисунок 13), которая включает в себя следующие элементы:

- 4 датчика клиренса, измеряющие относительное перемещение подрессоренной и неподрессоренной масс;
- 2 лазерных дальномера, измеряющие расстояние от нижней части бампера до дорожного полотна;
- 4 акселерометра, измеряющие вертикальное ускорение подрессоренных частей автомобиля над каждым колесом, причём один из них также измеряет ускорение вдоль продольной и поперечной осей;
- датчик скорости движения автомобиля;
- кнопка переключения режимов жесткости подвески;
- индикатор текущего режима подвески;
- электромагнитные клапаны, интегрируемые в конструкцию амортизаторов, осуществляющие непосредственное регулирование характеристик демпфирования;
- драйверы, позволяющие усилить сигнал управления;
- микроконтроллер, непосредственно осуществляющий сбор, обработку, вычисление и хранение данных;

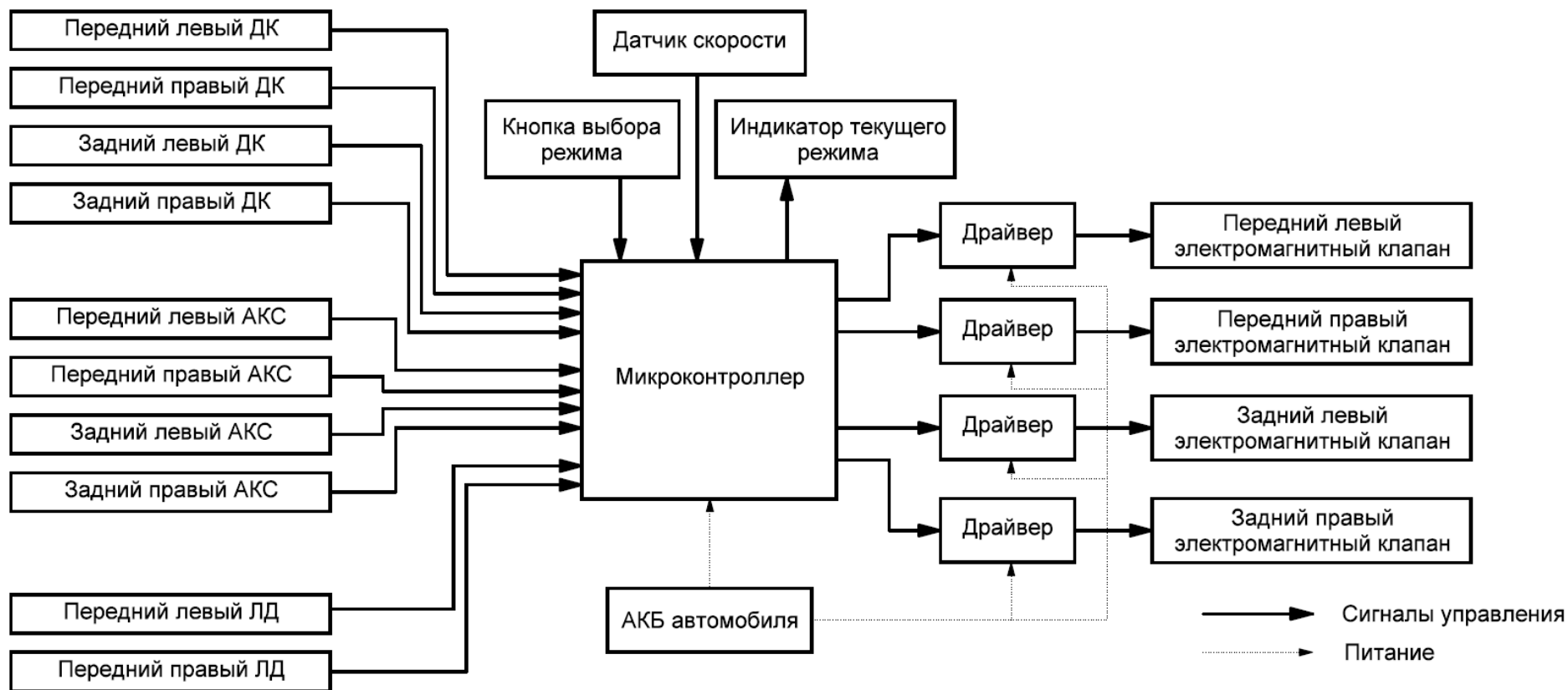


Рисунок 13 – Структурная схема системы

3 Выбор и обоснование элементной базы

3.1 Датчики клиренса

В качестве устройств, определяющих положение колес относительно кузова, выбраны четыре поворотных потенциометрических датчика положения и перемещения SP-1600, которые представляют собой делитель напряжения (рисунок 14). Из-за расположения в непосредственной близости к источникам брызг, грязи и пыли, главным критерием при выборе данных устройств, стал класс защиты IP 67. Каждый из этих датчиков крепится на корпусе автомобиля (на подпрессоренной части) и через механический рычаг соединяется с местом крепления соответствующего амортизатора и неподрессоренной части подвесной системы автомобиля.

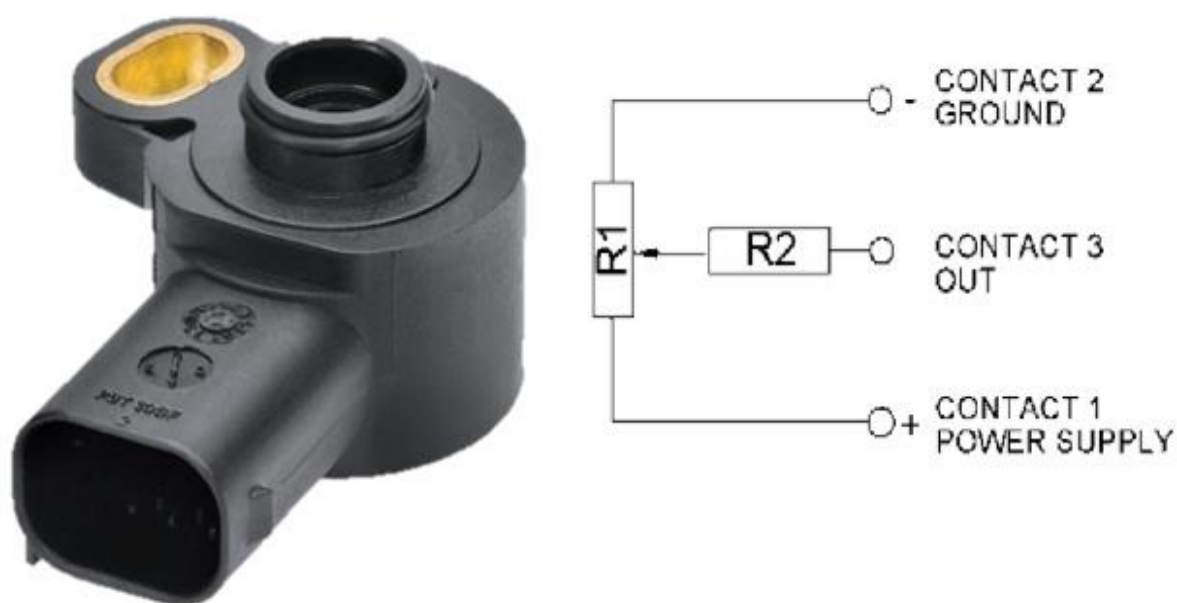


Рисунок 14 - Поворотный потенциометрический датчик SP-1600

Характеристики:

- тип датчика: потенциометрический, с возвратной пружиной;
- выходной сигнал: аналоговый, делитель напряжения;

- ограничение напряжения питания: 24 В;
- диапазон работы: $0 \dots 120 \pm 3^\circ$;
- погрешность: $\pm 2 \%$;
- стабильность позиционирования: 1° ;
- рабочий вращающий момент: $0,8 \dots 12 \text{ Н*см}$;
- сопротивления R1, R2: 5 кОм;
- рабочий температурный диапазон: $- 30 \dots + 120 \text{ }^\circ\text{C}$;
- рабочая скорость: 100 об/мин;
- уровень защиты: IP67.

3.2 Акселерометры

Акселерометр — это прибор, позволяющий измерять ускорение тела под действием внешних сил. МЭМС-акселерометры состоят из демпфированной массы на пружине, вытравленной в кремнии, конденсатора и электрода, находящегося между обкладками конденсатора (рисунок 15). Когда акселерометр ускоряется, масса движется относительно корпуса. Это движение вызывает изменение расстояния между электродом и обкладками, а следовательно и емкостей C_1 и C_2 , что фиксируется электроникой.

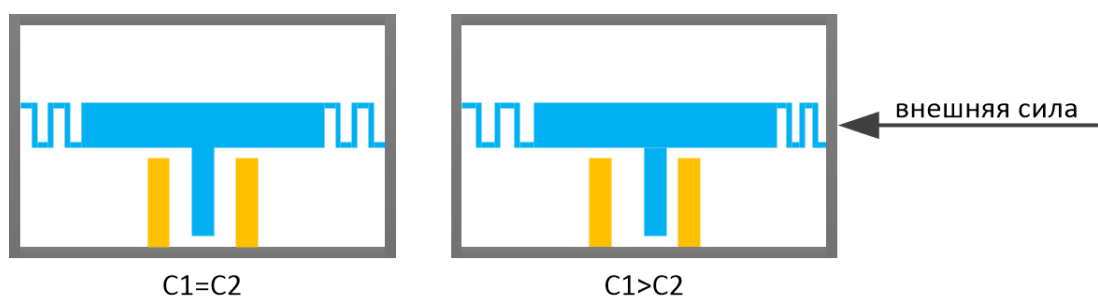


Рисунок 15 – Устройство МЭМС-акселерометра

В качестве акселерометров для разрабатываемой системы были выбраны четыре аналоговых модуля ADXL337 (рисунок 16). Данные устройства позволяют снимать показания ускорения относительно трёх осей.

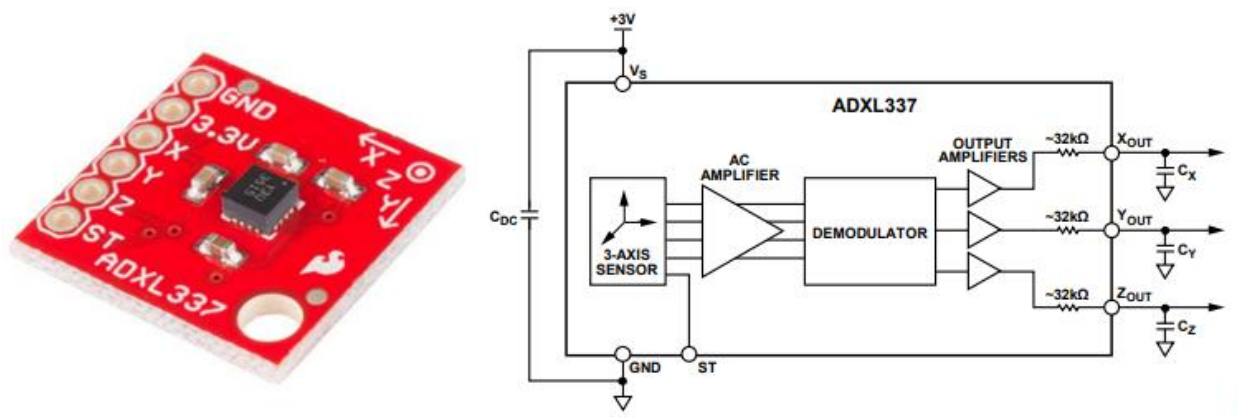


Рисунок 16 – Аналоговый акселерометр ADXL337

В данной работе предполагается использование трёх из них для измерения только вертикального ускорения, а одного – для измерений по всем трём осям (продольной, поперечной и вертикальной). Датчики должны быть установлены в местах крепления амортизаторов к корпусу автомобиля для непосредственного измерения вертикального ускорения подрессоренной массы.

Характеристики:

- тип датчика: 3-х осевой акселерометр;
- напряжение питания (DC): 1,8...3,6 В;
- потребляемый ток: 300 мкА;
- диапазон измерений: $\pm 3g$;
- тип выходного сигнала: аналоговый;
- выходное сопротивление: 32 кОм;
- выходная ёмкость:

по осям X и Y	–	0,003 мкФ;
по оси Z	–	0,01 мкФ;
- максимальная частота опроса:

по осям X и Y	–	1600 Гц;
по оси Z	–	500 Гц;
- рабочий температурный диапазон: - 40 ... + 85 °С.

3.3 Лазерные дальномеры

Лазерный дальномер – это прибор, который использует лазерный луч для определения расстояния до объекта. Наиболее распространенный метод измерения, используемый в таких устройствах – TOF (Time-of-Flight – измерение времени полета), который основан на измерении времени полёта узкого импульсного луча до объекта и обратно (рисунок 17).



Рисунок 17 – Принцип лазерного измерения расстояния

Выбор лазерного способа измерения расстояния обоснован значительно более высокой скоростью и точностью по сравнению с классическим ультразвуковым способом, а также отсутствием на рынке готовых ультразвуковых модулей, обеспечивающих необходимое для системы управления быстродействие.

Для разрабатываемой системы были выбраны два лазерных дальномера AFBR-S50MV85G (рисунок 18). Данные модули работают с использованием описанного выше метода TOF. В своём составе каждое устройство имеет встроенный инфракрасный лазерный источник света, матричный фотоприёмник и встроенные часы.

В данной работе предполагается установка лазерных дальномеров под передний бампер автомобиля. Однако данные устройства не имеют защиты от влаги и пыли, поэтому установка их должна осуществляться с применением

какого-либо герметичного корпуса или же каких-либо изоляционных материалов (изоляционная лента, герметик и т.п.).

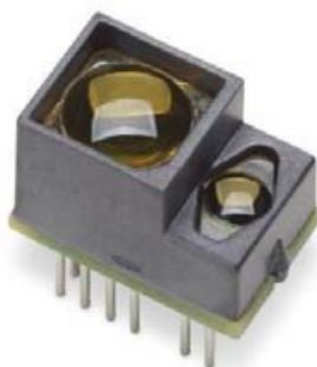


Рисунок 18 – Лазерный дальномер AFBR-S50MV85G

Характеристики:

- метод измерения: TOF;
- напряжение питания (DC): 4,5 ... 5,5 В;
- потребляемый ток: 33 мА;
- потребляемая мощность: 165 мW;
- излучатель: лазер 850 нм, класс 1 (безопасен для глаз);
- размер пятна: на расстоянии 100 мм – 8...10 мм
 на расстоянии 1000 мм – 63...80 мм
- приёмник: 32 пикселя;
- диапазон измерений: 50...10000 мм;
- погрешность измерений: <1 %;
- точность измерений: 0,1 мм;
- смещение нуля: ±10 мм;
- тип выходного сигнала: цифровой интерфейс SPI до 25 МГц;
- максимальная частота опроса: до 3 кГц;
- рабочий температурный диапазон: - 20 ... + 70 °С.

3.4 Датчик скорости

Для измерения скорости движения автомобиля в разрабатываемой системе используется датчик Холла А3144 (рисунок 19). Этот элемент выбран в силу своей простоты и надежности при использовании. Также присутствует полная защита от пыли и влаги за счёт цельного корпуса. Данный факт позволит установить этот датчик в непосредственной близости к вращающемуся колесу и измерять скорость его вращения посредством фиксирования наличия или отсутствия магнитного поля от небольшого магнита, прикрепленного к вращающемуся элементу.

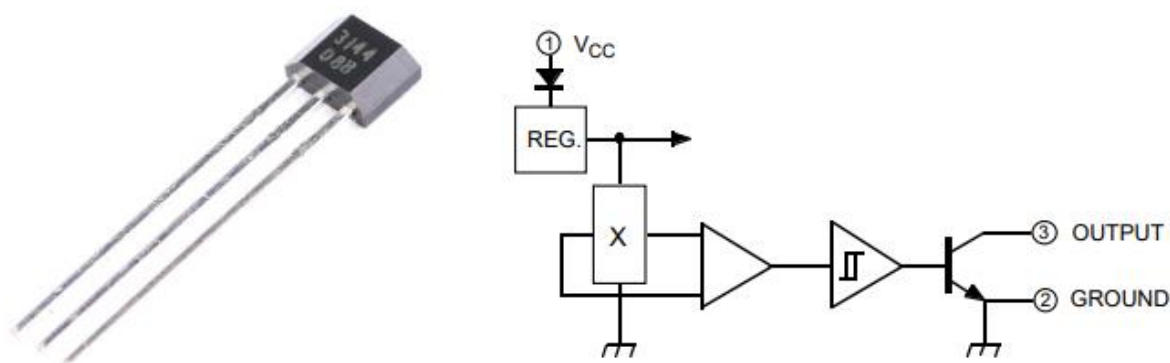


Рисунок 19 – Датчик Холла А3144

Характеристики:

- вид датчика: однополярный;
- тип датчика: дискретный;
- корпус: ТО-94;
- напряжение питания: 4,5... 24 В;
- максимальный выходной ток : 25 мА;
- время установления выхода: до 2 мкс;
- магнитный диапазон: от ± 20 Гс до ± 450 Гс;
- рабочий температурный диапазон: - 40°С ... + 85 °С.

3.5 Кнопка переключения режимов

В качестве переключателя режимов выбрана тактовая кнопка 6*6 мм (рисунок 20). Данное устройство работает, как нормально разомкнутый ключ. При нажатии на кнопку контакты внутри неё замыкаются, и через кнопку начинает протекать ток. Сама кнопка должна располагаться в салоне автомобиля, чтобы водитель мог беспрепятственно нажимать на неё для переключения режима подвески.



Рисунок 20 – Кнопка 6*6 мм

3.6 Индикатор текущего режима

В качестве индикатора текущего режима в разрабатываемой системе применяется три светодиода GNL-3012GD (рисунок 21), расположенных рядом с кнопкой. Каждый из них будет загораться каждый раз, когда включен соответствующий режим («Комфорт», «Оптимальный», «Спорт»).



Рисунок 21 – Светодиод GNL-3012GD

Характеристики:

- цвет: зелёный;
- номинальный прямой ток: 30 мА;
- напряжение на диоде при номинальном токе: 2,1 В;
- максимальное обратное напряжение: 5 В;
- обратный ток: 10 мкА;
- рабочий температурный диапазон: - 40 ... + 80 °С.

3.7 Исполнительные элементы

Как было отмечено ранее, в качестве способа управления жесткостью амортизаторов было выбрано регулирование с помощью электромагнитных клапанов. Принцип действия данных устройств показан на рисунке 22.

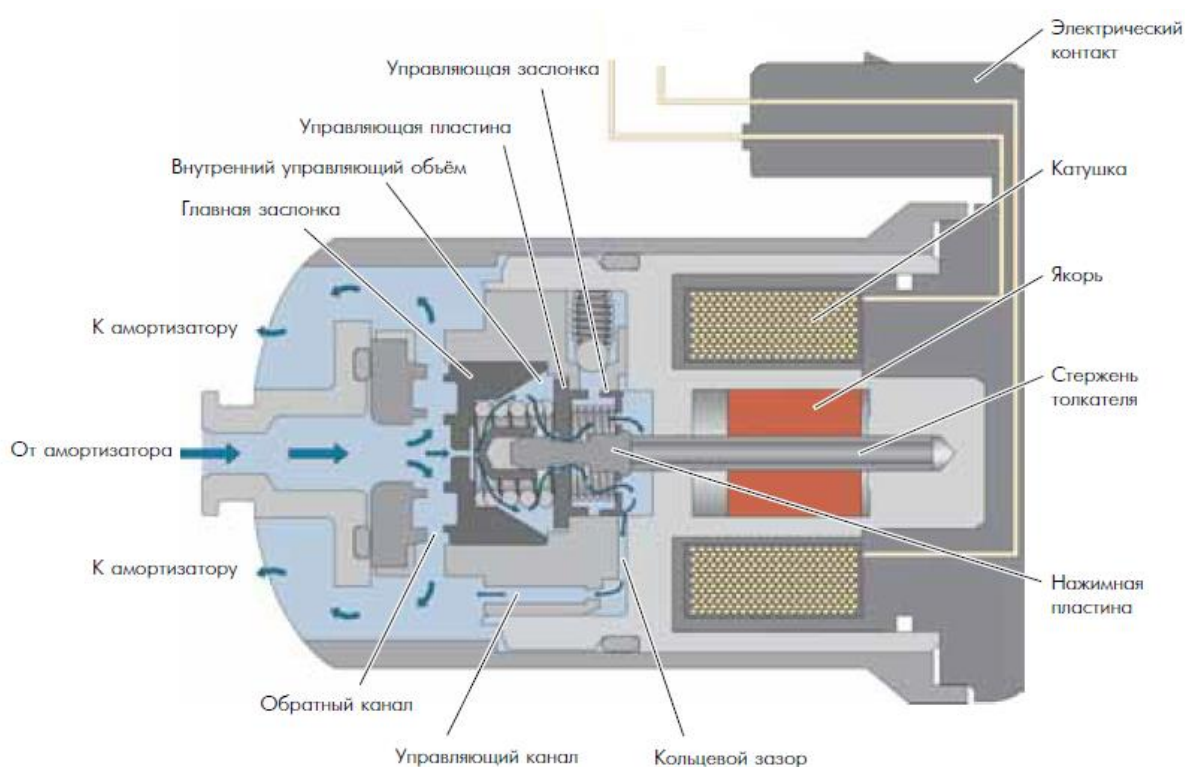


Рисунок 22 – Принцип работы электромагнитного клапана

При подаче управляющего напряжения на катушку возникает магнитное поле, которое перемещает стержень толкателя вместе с

закрепленным на нём якорем и тем самым обеспечивается открытие или закрытие отверстия в управляющей пластине. Это в свою очередь приводит к изменению давления внутри управляющего объёма и тем самым обеспечивается регулирование степени открытия главной заслонки, а, следовательно, и количества протекающего через обратный клапан масла.

В качестве исполнительных элементов в разрабатываемой системе будут использоваться электромагнитные клапаны CES8700 (Continuously controlled Electronic Suspension), интегрируемые в конструкцию регулируемых амортизаторов. Их внешний вид и внутреннее устройство представлены на рисунке 23. Данные устройства защищены по классу IP67, что позволяет использовать их в условиях непосредственного контакта с пылью и водой.



Рисунок 23 – Электромагнитный клапан CES8700

Характеристики:

- тип: пропорциональный клапан;
- напряжение питания: 12 В;
- потребляемый ток: 0 ... 1,6 А;

- пропускная способность: до 80 л/мин
- рабочее давление: 0 ... 120 бар;
- утечка: < 1 мл/мин;
- рабочий температурный диапазон: - 40...+ 120 °С.

3.8 Драйверы для управления исполнительными элементами

Электромагнитные клапаны при работе потребляют ток до 1,6 А. Микропроцессор, применяемый для управления данной системой, не сможет обеспечить нужный ток. Следовательно, необходимо применение устройств, позволяющих с помощью маломощного сигнала от контроллера, коммутировать силовые цепи исполнительных органов системы. Одними из таких устройств являются драйверы. В их основе лежат силовые транзисторы, подключенные по схеме Н-моста. Зачастую драйверы используются для управления двигателями постоянного тока, однако они также подходят и для управления электромагнитным клапаном.

В данной работе применяются два модуля с драйверами L298N ST (рисунок 24). Каждый из них имеет два независимо управляемых Н-моста, стабилизатор напряжения, а также клеммы для подключения питания, исполнительных элементов и управляющих сигналов.

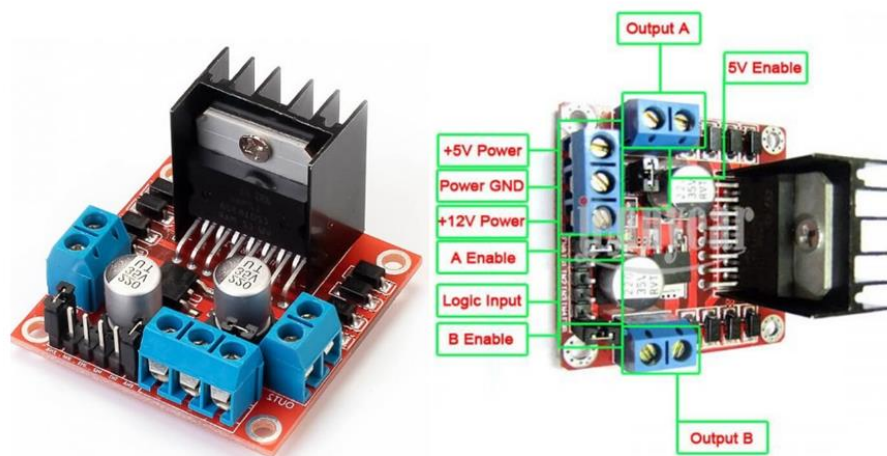


Рисунок 24 - Модуль с драйвером L298N ST

Характеристики:

- напряжение питания логики: 5 В;
- потребляемый логикой ток: 36 мА;
- напряжение питания исполнительных элементов: 5... 35 В;
- количество каналов: 2;
- рабочий ток драйвера (на каждый канал): 2 А;
- Максимальная мощность: 20 Вт (при температуре 75 °С);
- Диапазон рабочих температур: - 25 ...+ 135 °С.

3.9 Контроллер

На основе структурной схемы и параметров выбранных датчиков и исполнительных (в т.ч. индикаторных) устройств было определено количество сигналов каждого типа (входной/выходной, аналоговый/дискретный/цифровой, ШИМ, и т.д.), количество каналов связи, необходимые параметры питания датчиков, а также требуемая производительность обработки данных. И на основании этих сведений был произведён выбор управляющего устройства для данной системы.

В качестве устройства управления для разрабатываемой системы выбрана платформа Arduino Mega 2560 (рисунок 25), построенная на микроконтроллере ATmega2560. Плата имеет 54 цифровых входа/выхода (14 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта UART, кварцевый генератор 16 МГц, USB коннектор, разъем питания, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Программирование данного устройства осуществляется с помощью персонального компьютера в среде Arduino IDE. Устанавливается данное устройство таким образом, чтобы избежать прямого попадания на него воды и пыли.

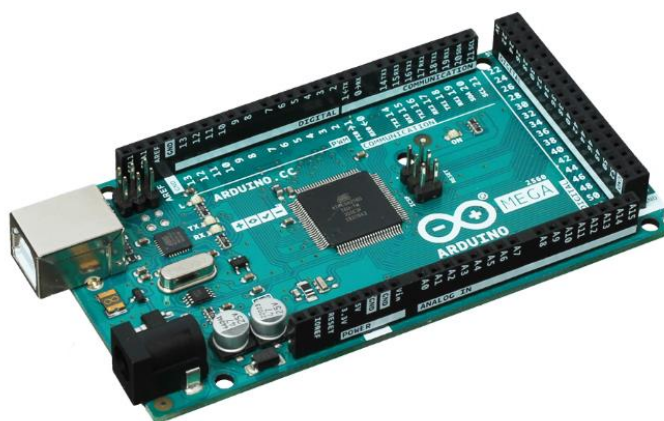


Рисунок 25 – Платформа Arduino Mega 2560

Характеристики:

- микроконтроллер: ATmega2560;
- рабочее напряжение: 5 В;
- входное напряжение (рекомендуемое): 7...12 В;
- входное напряжение (предельное) : 6...20 В;
- цифровые входы/выходы: 54 (14 из которых поддерживают ШИМ);
- аналоговые входы: 16;
- максимальный ток для вывода 5 В: 800 мА;
- постоянный ток через вход/выход: 40 мА;
- максимальный ток для вывода 3,3 В: 50 мА;
- флэш-память: 256 КВ (из которых 8 КВ используются для загрузчика);
- ОЗУ: 8 КВ;
- энергонезависимая память: 4 КВ;
- тактовая частота: 16 МГц.

4 Принципиальная схема системы

Электрическая принципиальная схема разрабатывается с учётом выбранных для системы управления компонентов и требований ЕСКД [25]. Принципиальная схема представлена в приложении Б, перечень элементов указан в приложении В. Питание контроллера и исполнительных устройств осуществляется от АКБ автомобиля. Питание остальных устройств осуществляется от внутреннего источника напряжения контроллера.

4.1 Подключение датчиков клиренса

Используемые в разрабатываемой системе поворотные потенциометрические датчики SP-1600 подключаются к плате Arduino через разъёмы XS2-XP2, XS3-XP3, XS4-XP4, XS5-XP5. Питание подаётся с разъёма платы +5V, а выходной сигнал с каждого датчика поступает соответственно на аналоговые входы А0–А3. Встроенные сопротивления датчиков R1–R8 равные 5 кОм ограничивают выходной ток на уровне 0,5–1 мА при напряжении питания 5 В.

4.2 Подключение акселерометров

Модули аналоговых трёх осевых акселерометров ADXL337 имеют в своём составе встроенные операционные усилители, которые позволяют напрямую подключать данные устройства к контроллеру. Подключение производится через разъёмы XS6-XP6, XS7-XP7, XS8-XP8, XS9-XP9. Питание подаётся с разъёма платы +3,3V. Вывод ST каждого акселерометра замыкается на землю, либо оставляется неподключенным. Выходные каналы первого акселерометра OUT X, OUT Y, OUT Z подключаются к аналоговым входам А4, А5, А6 контроллера. Остальные три акселерометра нужны для измерений лишь вдоль одной из осей. Их выходы OUT X подключаются соответственно к портам А7, А8, А9.

4.3 Подключение лазерных дальномеров

Данные устройства параллельно подключаются к плате Arduino через интерфейс SPI. Подключение производится с применением разъемов XS10-XP10, XS11-XP11. Выводы MOSI, MISO и SCK подключаются к одноименным выводам на плате. Также через выводы CS, подключенные соответственно к портам D44 и D45 с поддержкой ШИМ, производится выбор датчика, который в данный момент может обмениваться данными с контроллером. Лазерные дальномеры AFBR-S50MV85G не имеют встроенного стабилизатора питания. Питание поступает с разъема +5V на плате Arduino. Для уменьшения помех от пульсаций питания при работе устройства необходимо подключение конденсаторов между линиями питания и заземления лазера и приемника в соответствии со схемой, приведённой в руководстве данного устройства [26] (рисунок 26).

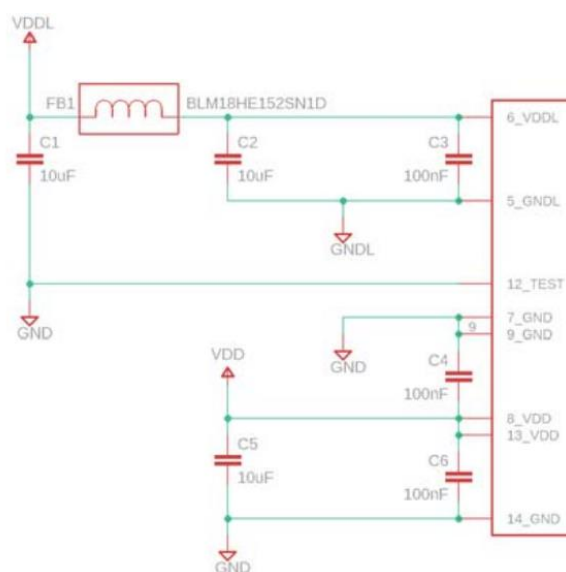


Рисунок 26 – Питание лазерного дальномера AFBR-S50MV85G

В верхней части схемы расположены линии питания для импульсного лазера с высокой частотой следования импульсов, а в нижней – приемника лазерного сигнала. Стоит отметить, что данная схема позволяет сохранить высокую скорость измерений и не потерять при этом точность.

4.4 Подключение датчика скорости

Датчик Холла А3144, который используется в разрабатываемой системе в качестве датчика скорости, подключается к контроллеру через разъём XS12-XP12. Питание от разъёма +5V на плате Arduino. Заземление на соответствующий вывод GND платы. Выход датчика подключен к порту прерывания D2. При подключении датчика необходимо применение подтягивающего резистора R13, соединяющего линию питания и линию выходного сигнала датчика. Это необходимо, чтобы гарантировать уровень логической единицы на входе D2 при срабатывании датчика. Минимальный номинал данного резистора обусловлен ограничением по току для выводов платы Arduino в 40 мА. При напряжении питания 5В:

$$R_{min} = \frac{U}{I} = \frac{5}{0,04} = 125 \text{ Ом.}$$

При этом данный резистор не должен оказывать влияния на другие участки цепи при замыкании, следовательно, выбирать его номинал нужно значительно больше рассчитанного значения. Поэтому был выбран номинал 10 кОм.

4.5 Подключение кнопки переключения режимов

Кнопка подключается к порту аппаратного прерывания D3 через инвертирующий триггер Шмитта и с использованием RC-цепи. Это необходимо для исключения дребезга поступающего на плату сигнала. В качестве резистора выбран подтягивающий резистор R12 номиналом 10 кОм. Номинал данного резистора рассчитывается так же, как и в случае подтягивающего резистора для датчика Холла. В качестве конденсатора выбран конденсатор C13 номиналом 10 мкФ. Таким образом, временная постоянная данной RC-цепи:

$$\tau = R * C = 10000 * 0,00001 = 0,1 \text{ с.}$$

С применением данной схемы сигнал, поступающий на вход D25, не будет иметь дребезга, что позволит качественно управлять системой. Питание триггера и кнопки заводится от разъёма +5V.

4.6 Подключение светодиодного индикатора

Индикатор состоит из трёх отдельно подключенных светодиодов. Данные устройства питаются от напряжения логического нуля или логической единицы на соответствующих выходах платы D22, D23, D24. Подключение производится через токоограничивающие резисторы R9, R10, R11. Они имеют одинаковый номинал, который рассчитывается с учётом их номинального тока 30 мА и номинального напряжения 2,1 В. При напряжении логической единицы 5 В расчётный номинал данных резисторов:

$$R_{min} = \frac{U}{I} = \frac{5 - 2,1}{0,03} \approx 100 \text{ Ом.}$$

Для снижения тока через выводы платы, и обеспечения при этом достаточной яркости светодиодов был выбран больший номинал резисторов, а именно 220 Ом.

4.7 Подключение драйверов

Модули с драйверами L298N ST подключаются к Arduino через разъёмы XS13-XP13, XS14-XP14. Питание модулей производится от сети +12V. Каждый модуль имеет встроенный стабилизатор напряжения, через который питаются все логические элементы модуля. Выводы ENA, ENB используются для включения и выключения питания исполнительных органов. Они подключаются к ШИМ портам контроллера D12, D9 для первого драйвера и D8, D5 для второго драйвера. Выводы модулей IN1, IN3 и IN2, IN4 попарно соединены и подключены к портам платы Arduino D11, D10 для первого модуля и D7, D6 для второго модуля.

4.8 Подключение исполнительных устройств

К клеммам OUT1, OUT2 и OUT3, OUT4 каждого драйвера подключаются электромагнитные клапана, с помощью которых происходит регулирование степени демпфирования амортизаторов.

5 Алгоритм работы системы

Система управления жесткостью подвески производит регулирование демпфирующих свойств амортизаторов в соответствии с алгоритмом, включающим в себя 5 этапов:

1. инициализация микроконтроллера;
2. сбор сигналов от датчиков;
3. обработка полученных сигналов и вычисление перемещений, скоростей и ускорений поддресоренных и неподдресоренных частей автомобиля по различным направлениям;
4. непосредственное вычисление управляющего воздействия для каждого исполнительного элемента;
5. вывод сигналов управления и индикации, возврат к пункту 2.

На первом этапе происходит запуск всей системы путём подачи питающего напряжения на МК и драйверы исполнительных элементов. Сразу после подачи питания начинается процесс инициализации, во время которого происходит подключение необходимых библиотек, настройка портов ввода/вывода, таймеров, прерываний, а также объявление и инициализация используемых в дальнейшей работе переменных и констант. Дальнейшая работа системы осуществляется в бесконечном цикле до отключения питания.

На втором этапе выполняется последовательный сбор данных от всех имеющихся в системе датчиков: акселерометров, датчиков положения подвески, лазерных дальномеров, энкодера, кнопки выбора режимов. После чего все значения записываются в предварительно объявленные переменные. Во время сбора информации также происходит усреднение показаний путём пятикратного повтора измерений для аналоговых датчиков положения подвески и лазерных дальномеров для уменьшения влияния случайных отклонений показаний и увеличения точности дальнейших вычислений.

На третьем этапе по полученным значениям от датчиков вычисляются следующие значения: текущая скорость движения автомобиля, вертикальные скорости поддрессоренной массы (в местах установки акселерометров), ускорения корпуса автомобиля вдоль продольной, поперечной и вертикальной осей, относительные скорости и ускорения поддрессоренных и неподдрессоренных масс (скорости и ускорения каждого штока амортизаторов), изменения рельефа.

На четвёртом этапе, используя обработанные данные, МК вычисляет скважность выходного ШИМ сигнала, подаваемого на драйверы для независимого управления каждым амортизатором. В первую очередь учитывается скорость движения автомобиля V . Если она превышает значение 30 м/с, по умолчанию выставляется 100% скважность ШИМ для безопасности на дороге. Во всех остальных случаях осуществляется вычисление необходимой для гашения вертикальных колебаний силы для каждого амортизатора. Данная сила находится как сумма нескольких составляющих.

На скоростях 15...30 м/с добавляется постоянная составляющая F_v для увеличения общей жесткости подвески:

$$F_v = 0,2 * C_{max} * (z_a' - z_r'),$$

где C_{max} – максимальная жесткость амортизатора;

z_a' и z_r' – вертикальные скорости поддрессоренной и неподдрессоренной масс соответственно.

Для определения относительного перемещения подвески на скоростях до 10 м/с используются показания датчиков клиренса, на скоростях свыше 10 м/с – лазерных дальномеров. Это необходимо для вычисления и подачи управляющего сигнала на исполнительные элементы заблаговременно в силу инертности процессов регулирования жесткости в амортизаторе. Далее для каждого амортизатора в соответствии с методом Skyhook производится

вычисление составляющей, направленной на уменьшение вертикальных колебаний поддресоренных частей F_{sh} .

Вычисление производится в соответствии со следующей системой уравнений:

$$F_{sh} = \begin{cases} k_S * z_a, & \text{если } \dot{z}_a * (z_a - z_r) \geq 0 \\ 0, & \text{если } \dot{z}_a * (z_a - z_r) < 0 \end{cases}$$

где k_S – коэффициент жесткости виртуального амортизатора, соединенного с «небом».

При наличии ускорения относительно продольной оси автомобиля (разгон/торможение), пропорционально его значению вычисляется соответствующая составляющая F_{rt} по формуле [27]:

$$F_{rt} = \frac{M_A * a_r * H_g}{2 * L * L_2},$$

где M_A – масса поддресоренных частей;

a_r – ускорение вдоль продольной оси;

H_g – высота центра масс;

L – расстояние между колёсами;

L_2 – расстояние от колёс, на амортизаторы которых подаётся дополнительное воздействие, до центра масс.

При торможении она прибавляется к значениям, подаваемым на передние амортизаторы, а при разгоне – к значениям, подаваемым на задние амортизаторы. Далее аналогичные действия производятся относительно ускорения вдоль поперечной оси при повороте влево/вправо. Соответствующая составляющая F_{rl} прибавляется для расчета управляющего воздействия: при повороте влево – к правым амортизаторам, а при повороте вправо – к левым амортизаторам. Вычисляется она по формуле [27]:

$$F_{rl} = 0,6 * a_n * M_A * H_{кр} * \frac{1}{B},$$

где a_n – поперечное ускорение, фиксируемое акселерометром;

$H_{кр}$ – радиус крена;

B – расстояние между колесами одной оси.

После вычисления всех составляющих, рассчитывается суммарная сила, которую необходимо развить амортизатору F и вычисляется необходимая жесткость в зависимости от скорости хода штока:

$$C = \frac{F}{\dot{z}_a - \dot{z}_r}$$

Далее проверяется, входит ли данная жесткость в интервал $C_{min} \dots C_{max}$. При выходе полученного значения жесткости за пределы интервала ему присваивается новое значение, равное соответственно ближайшей границе интервала.

По полученному значению жесткости находится необходимое значение управляющего воздействия:

$$D_t = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} * 100\%$$

После вычисления необходимого управляющего воздействия в зависимости от выбранного режима («Комфорт», «Оптимальный», «Спорт»), происходит окончательное формирование значения управляющего сигнала, путём его ограничения в соответствие с выбранным диапазоном демпфирования. (ШИМ сигнал: для режима «Комфорт» – 0...70%, для режима «Оптимальный» – 20...80%, для режима «Спорт» – 70...100%).

На последнем этапе происходит присвоение выходам, управляющим исполнительными устройствами, соответствующих вычисленных значений

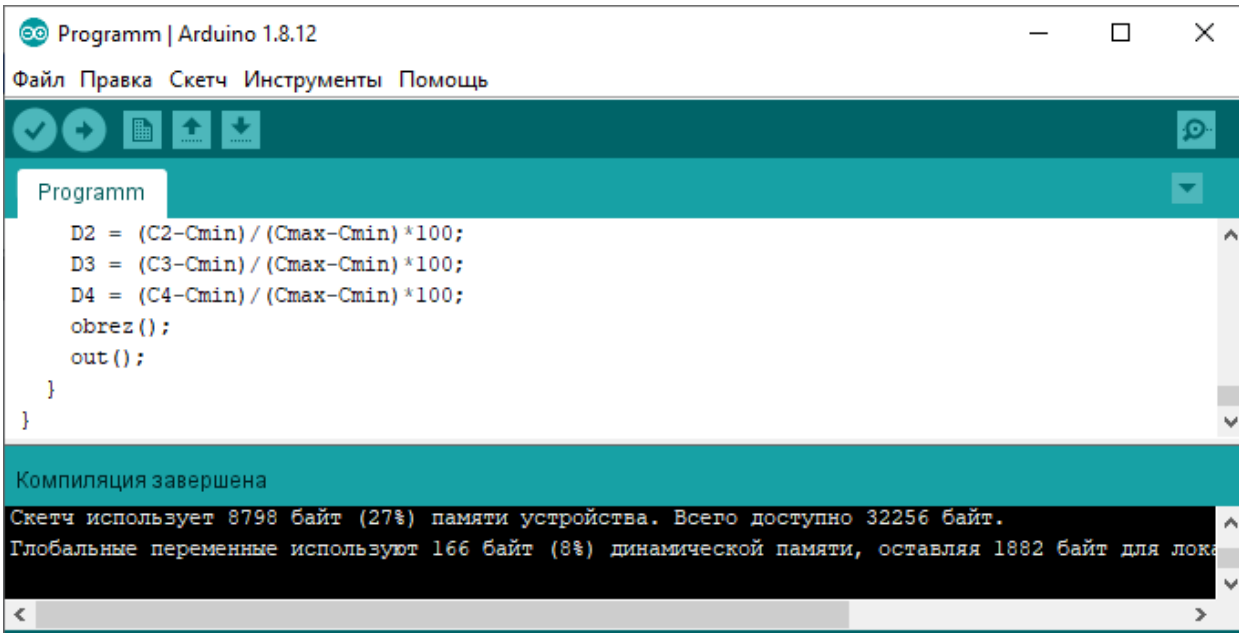
скважности, а также производится изменение состояния индикатора выбранного режима.

Алгоритм работы системы управления в виде блок-схем представлен в приложении Г.

6 Разработка программного обеспечения для управляющего устройства

По составленному алгоритму работы системы управления жесткостью подвески и разработанной принципиальной схеме была написана программа для микроконтроллера на языке C++ в среде программирования Arduino IDE. Сама программа включает в себя несколько подпрограмм, а также бесконечный цикл, в котором и выполняется обработка сигналов с датчиков и вычисление управляющего воздействия для электромагнитных клапанов.

Ниже представлен скриншот, который свидетельствует об успешной компиляции написанной программы и отсутствии в ней синтаксических ошибок.



```
Programm | Arduino 1.8.12
Файл Правка Скетч Инструменты Помощь

Programm
D2 = (C2-Cmin) / (Cmax-Cmin) * 100;
D3 = (C3-Cmin) / (Cmax-Cmin) * 100;
D4 = (C4-Cmin) / (Cmax-Cmin) * 100;
obrez();
out();
}
}

Компиляция завершена
Скетч использует 8798 байт (27%) памяти устройства. Всего доступно 32256 байт.
Глобальные переменные используют 166 байт (8%) динамической памяти, оставляя 1882 байт для локальных переменных
```

Рисунок 27 – Успешная компиляция программы

Листинг программы представлен в приложении Д.

7 Моделирование системы в программном пакете Amesim

7.1 Построение системы

По разработанной ранее структурной схеме и алгоритму работы была создана модель четверти массы автомобиля с автоматизированной системой управления жесткостью подвески автомобиля в программном пакете Amesim. При этом для удобства была сделана вторая подобная модель, не имеющая системы регулирования. Это было сделано с целью проведения экспериментов, в результате которых можно оценить общую эффективность работы системы, найти её оптимальные параметры, а также для наглядного представления работы адаптивной системы и сравнения её с пассивной системой.

На рисунке 28 представлен внешний вид окна разработки скетча.

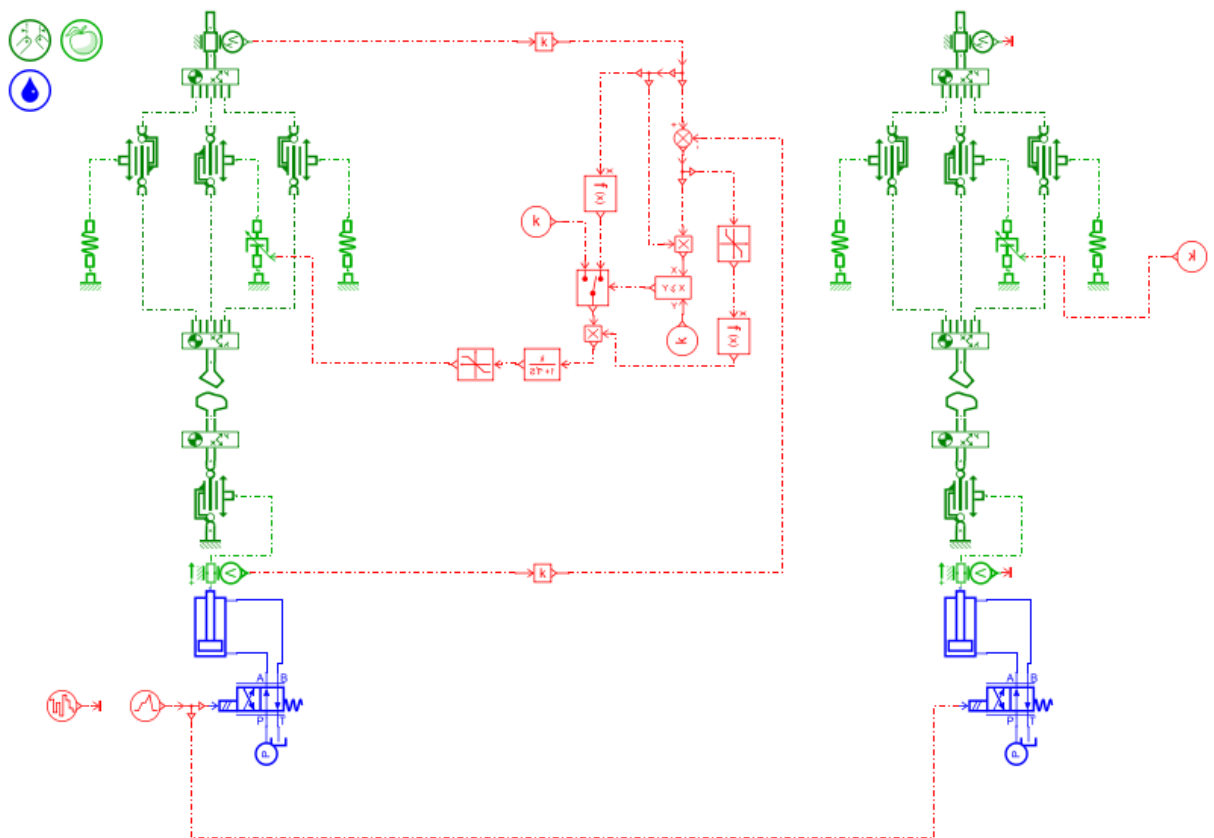


Рисунок 28 – Внешний вид окна разработки скетча

При моделировании использовались объекты из следующих библиотек:

- планарная механика (темно-зеленый цвет);
- простая механика (светло-зеленый цвет);
- обработка сигналов (красный цвет);
- гидравлика (синий цвет).

На рисунке 29 представлен внешний вид окна анимации моделей с использованием планарной механики. Графическое отображение адаптивной и пассивной систем одинаковое. Верхнее треугольное тело – это поддрессоренная масса, нижнее – неподдрессоренная масса. Между ними находятся два упругих элемента и один диссипативный элемент, которые имитируют подвеску автомобиля, способную перемещаться вдоль вертикальной оси. Снизу находится гидроцилиндр, имитирующий неровности дорожного покрытия. Неподдрессоренная масса связана с источником внешнего воздействия через элемент, имитирующий механический контакт двух тел (контакт колеса и дороги).

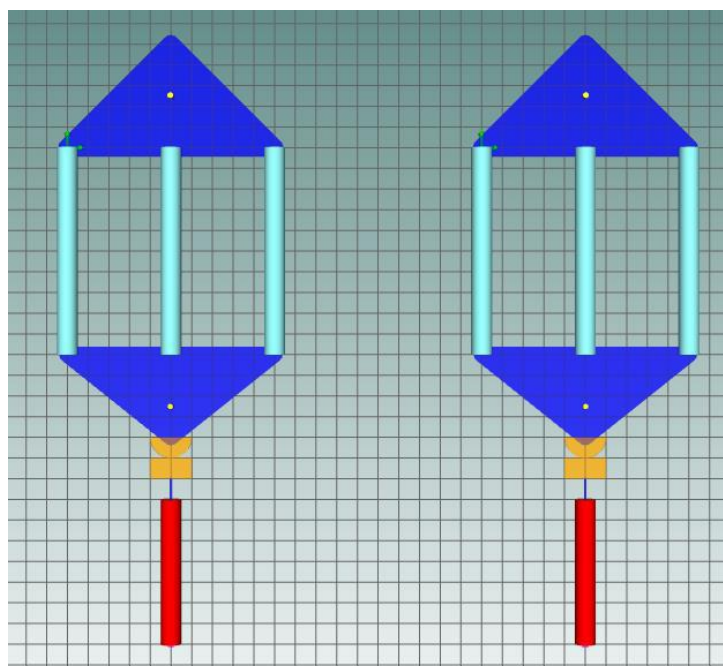


Рисунок 29 – Внешний вид окна анимации модели с использованием планарной механики

Основные параметры построенных моделей занесены в таблицу 2. Стоит отметить, что адаптивная и пассивная модели четверти массы автомобиля имеют одинаковые механические характеристики. Разница лишь в наличии системы управления коэффициентом демпфирования амортизатора у первой. У второй же коэффициент демпфирования остаётся постоянным. Значения параметров взяты исходя из данных, приведённых в источнике [23].

Таблица 2 – Основные параметры моделей

Параметр	Адаптивная модель	Пассивная модель
Подрес. масса m_A , кг	350	350
Неподрес. масса m_R , кг	25	25
Жесткость пружин k_0 , $\frac{H}{м}$	22000	22000
Коэф. демпфирования C , $\frac{H \cdot c}{м}$	300...3000	1200
Коэф. Skyhook C_{SH} , $\frac{H \cdot c}{м}$	1900	—

7.2 Экспериментальная часть

В ходе испытаний созданных моделей были получены зависимости вертикальных координат и ускорений обеих моделей, а также возмущающего воздействия (ВВ) от времени. Кроме этого в каждом эксперименте были построены спектры ускорений на частотах 0...30 Гц. В качестве ВВ в первой и второй сериях экспериментов использовался случайный сигнал с задаваемым диапазоном и частотой его изменения. В третьей серии экспериментов ВВ имело трапецеидальную форму, и также можно было изменять его амплитуду и частоту.

7.2.1 Исследование характеристик системы при разных диапазонах изменения коэффициента демпфирования

В первой серии экспериментов было проведено сравнение характеристик работы системы при выборе различных диапазонов изменения жесткости, которые приведены в работах [21], [22], [23]. Полученные зависимости представлены на рисунках 30, 31, 32.

В результате можно видеть, что при диапазоне $1200 \dots 2500 \frac{H \cdot c}{M}$ система гасит лишь колебания ускорений, частотой до 3 Гц, при этом значительно увеличиваются ускорения поддресоренных масс на больших частотах. При диапазоне $500 \dots 8500 \frac{H \cdot c}{M}$ эффективно гасятся ускорения поддресоренной массы на частотах до 6 Гц. Однако, на более высоких частотах амплитуды ускорений у активной системы значительно выше, чем у пассивной, что говорит о значительных вибрациях, передаваемых через подвеску корпусу автомобиля.

Наилучшие характеристики показала система с диапазоном регулирования $300 \dots 3000 \frac{H \cdot c}{M}$. Такая система обеспечивает эффективное гашение колебаний до 10 Гц и при этом не увеличивает вибрации, передаваемые поддресоренной массе.

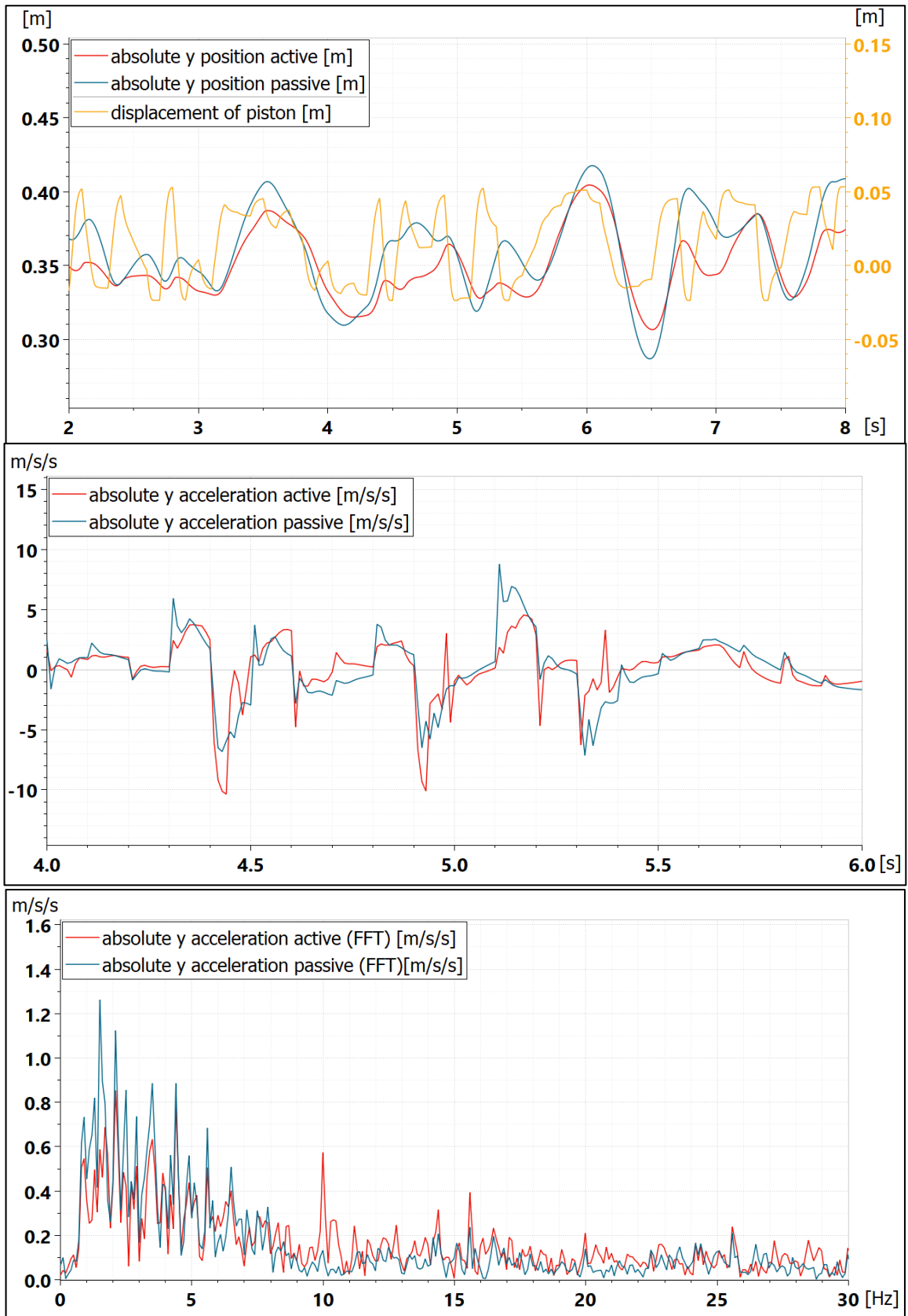


Рисунок 30 – $C = 300 \dots 3000 \frac{H \cdot c}{M}$, амплитуда ВВ = 5 см, частота ВВ = 10 Гц

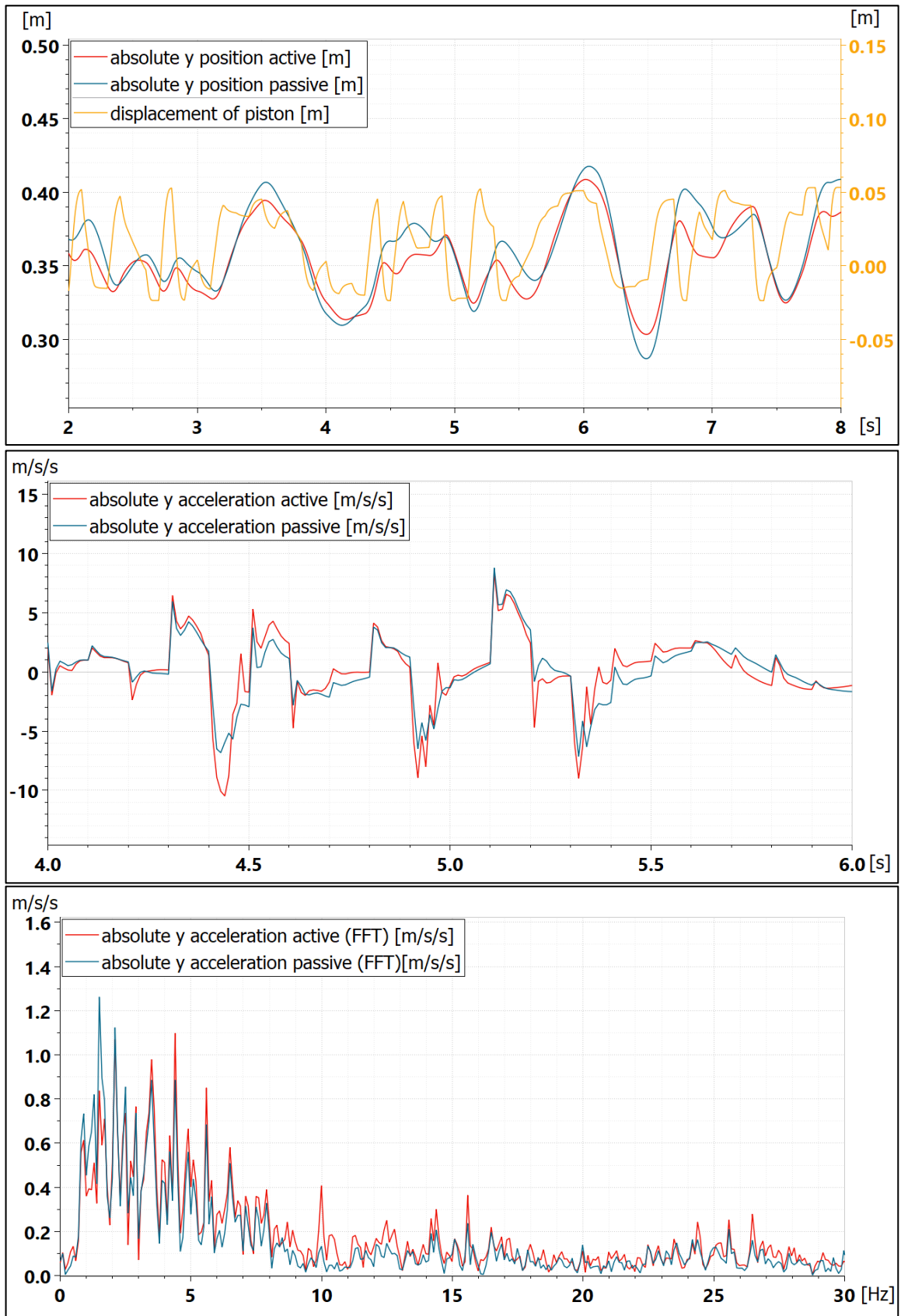


Рисунок 31 – $C = 1200 \dots 2500 \frac{H \cdot c}{M}$, амплитуда ВВ = 5 см, частота ВВ = 10 Гц

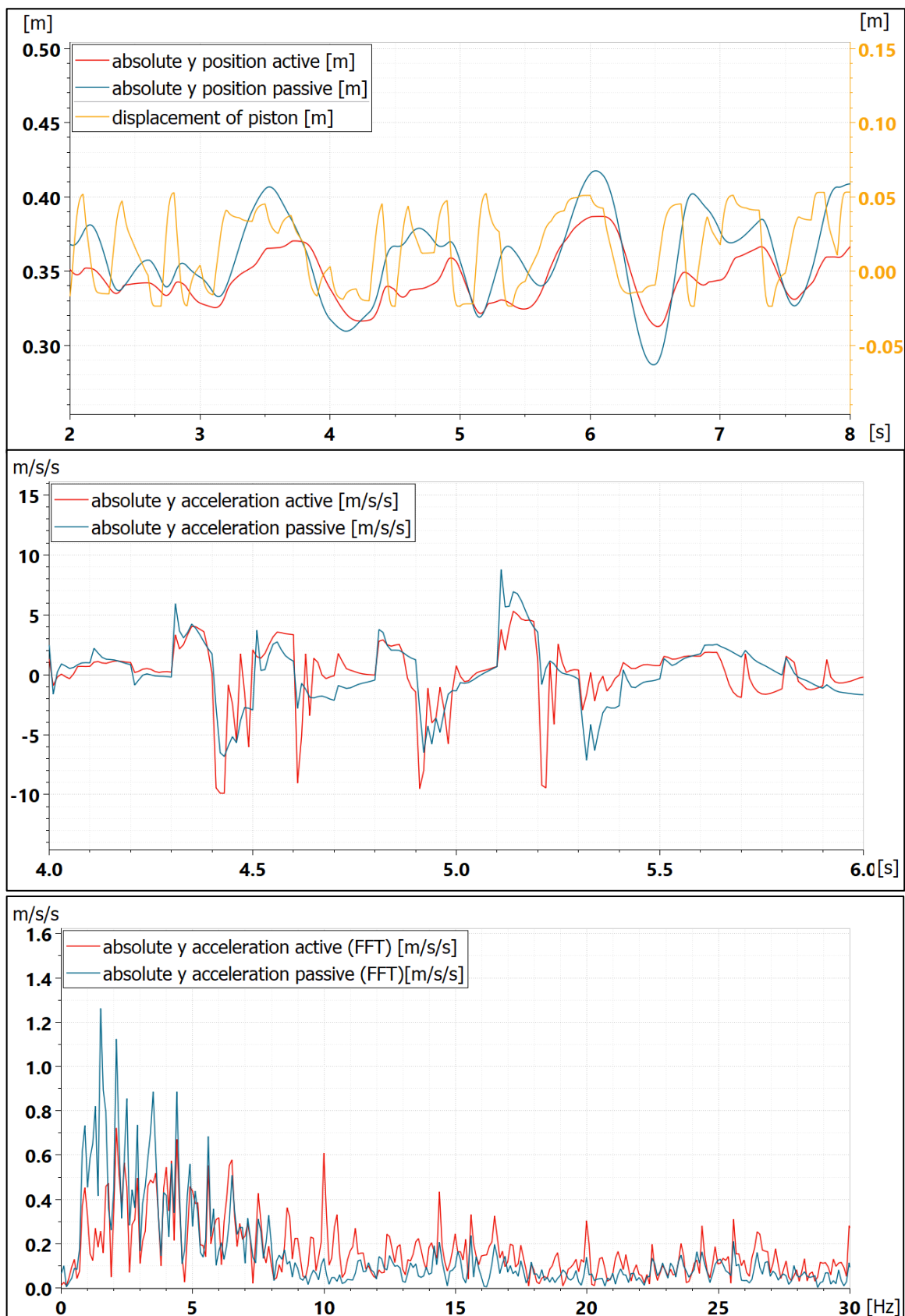


Рисунок 32 – $C = 500 \dots 8500 \frac{H \cdot c}{M}$, амплитуда ВВ = 5 см, частота ВВ = 10 Гц

7.2.2 Исследование характеристик системы при разных частотах возмущающего воздействия

Во второй серии экспериментов было проведено сравнение характеристик работы системы при разных частотах ВВ. Таким образом было произведено имитирование различной скорости движения автомобиля. Полученные зависимости представлены на рисунках 33, 34, 35.

В результате второй серии экспериментов было выявлено значительное снижение амплитуд ускорений поддресоренной массы на частотах до 10 Гц. При увеличении частоты случайного возмущающего воздействия на кузов передаётся больше вибраций через подвеску, однако, вертикальные раскачивания кузова по-прежнему хорошо гасятся адаптивной системой подвески. На частоте близкой к резонансной частоте системы, которая находится по формуле:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{22000/350} \approx 1,26 \text{ Гц,}$$

амплитуда ускорений снижается приблизительно в 2 раза.

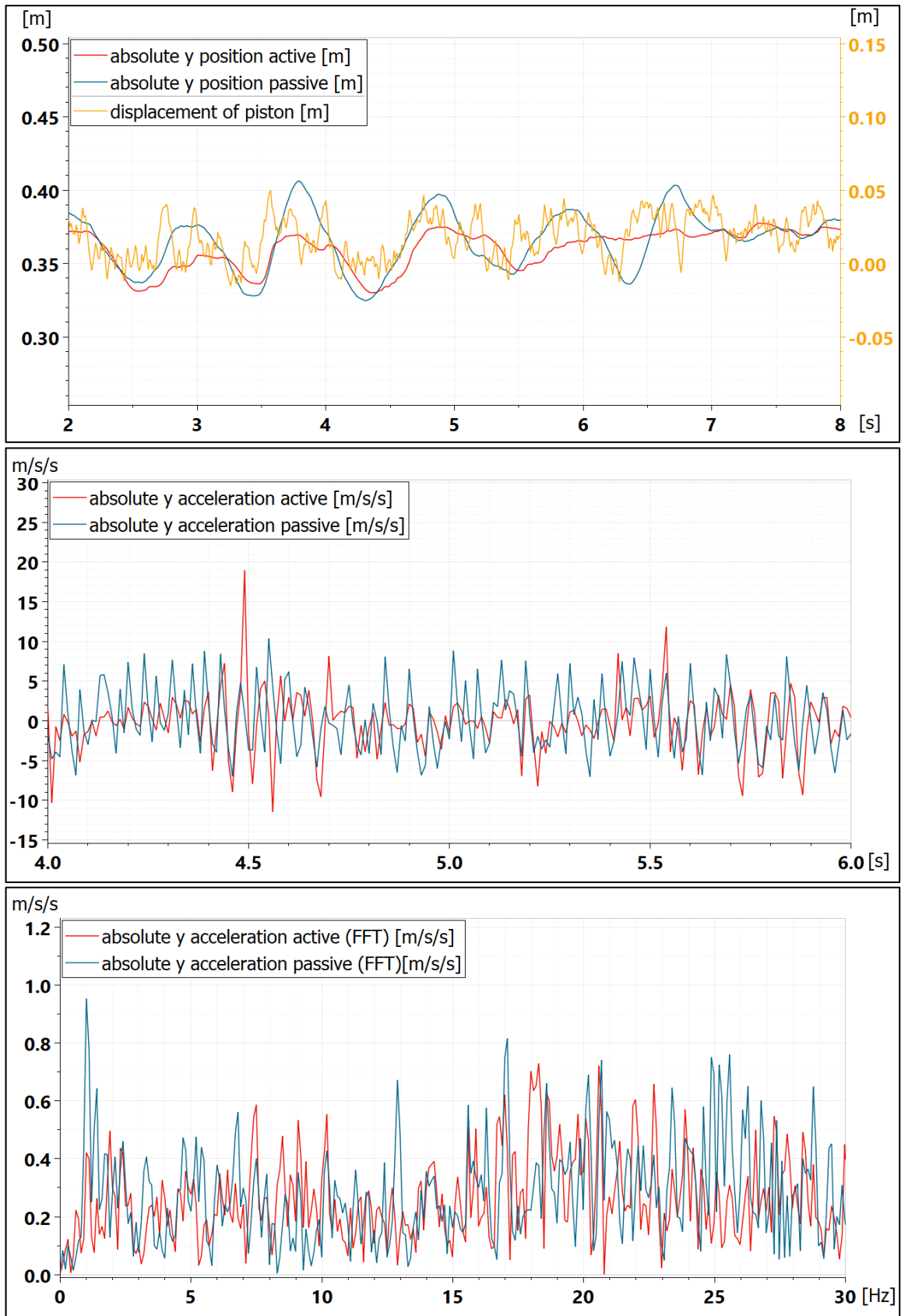


Рисунок 33 – $C = 300 \dots 3000 \frac{H \cdot c}{m}$, амплитуда ВВ = 5см, частота ВВ = 100Гц

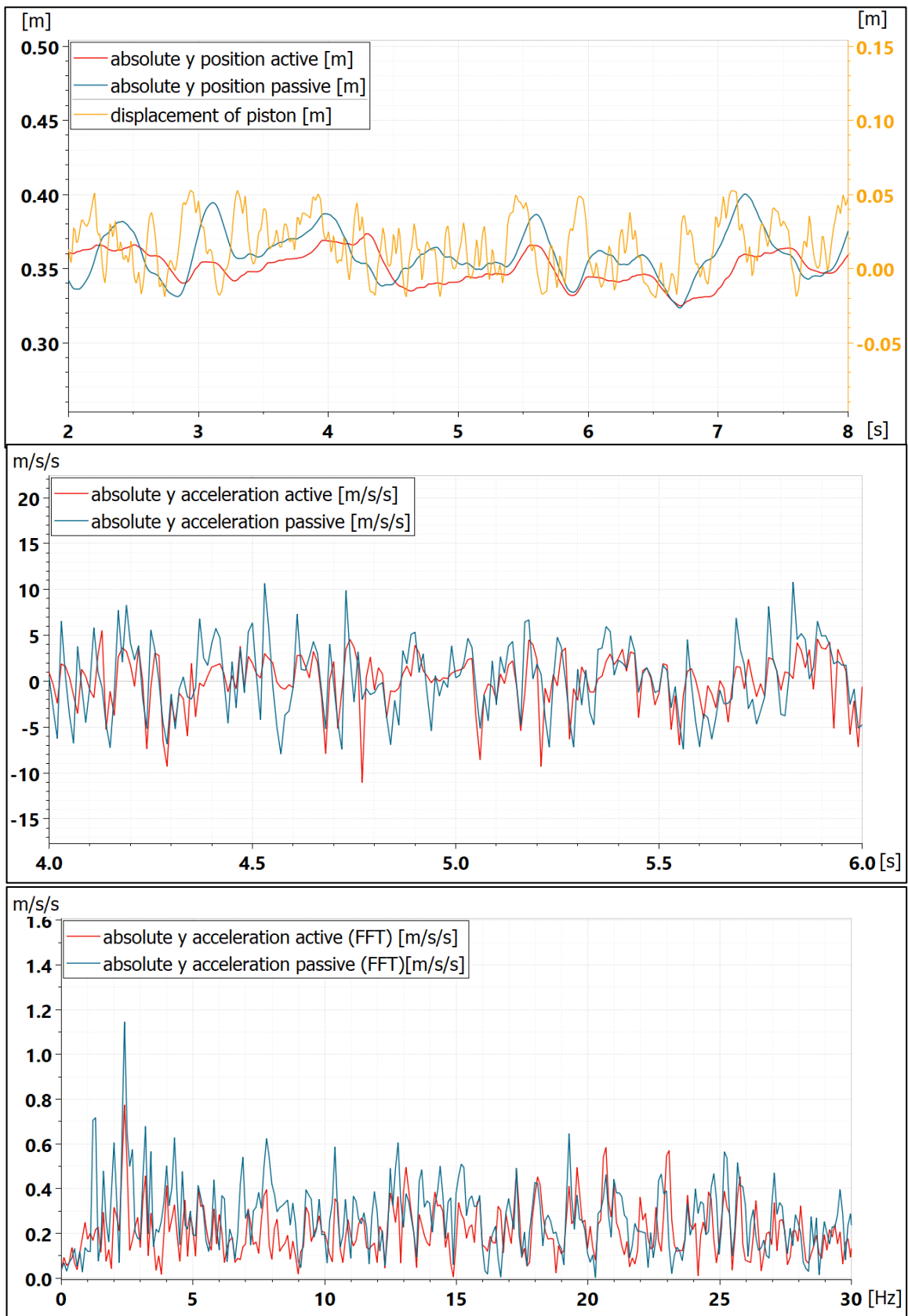


Рисунок 34 – $C = 300 \dots 3000 \frac{H \cdot c}{m}$, амплитуда ВВ = 5 см, частота ВВ = 50 Гц

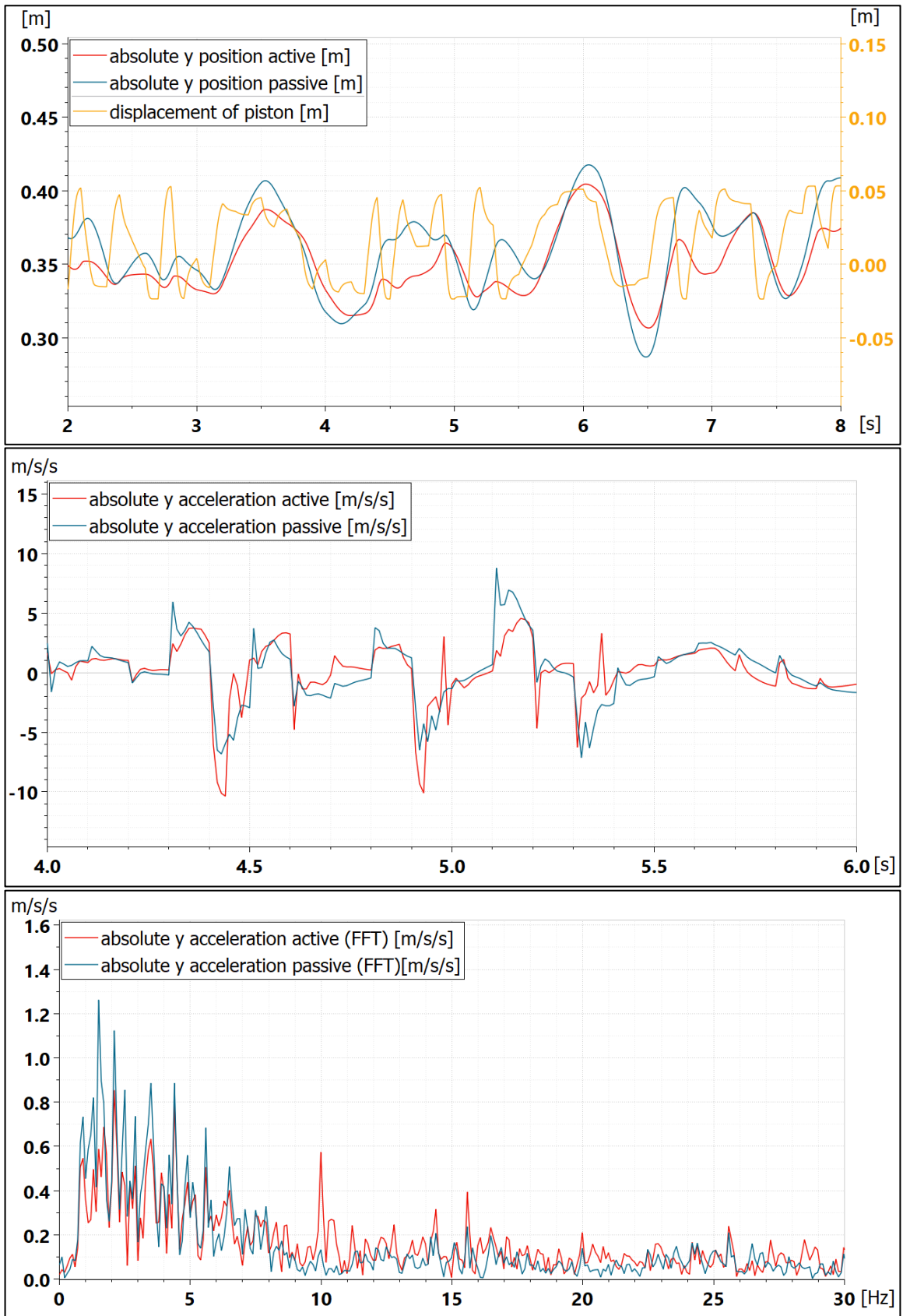


Рисунок 35 – $C = 300 \dots 3000 \frac{H \cdot c}{M}$, амплитуда ВВ = 5 см, частота ВВ = 10 Гц

7.2.3 Исследование характеристик системы при подаче трапецеидального возмущения различной амплитуды

В третьей серии экспериментов было проведено сравнение характеристик работы системы при разных амплитудах ВВ, которое имело трапецеидальную форму. Это позволило наглядно представить, как происходит переходный процесс в системе с наличием регулируемого демпфера и сравнить полученный результат с пассивной системой демпфирования. Полученные зависимости представлены на рисунках 36, 37, 38.

В результате данной серии экспериментов было выявлено то, что адаптивная система снижает ударные нагрузки, делая их менее резкими (подвеска работает, как «мягкая» при резком воздействии) и значительно уменьшает амплитуду колебаний подрессоренной массы и время переходного процесса (подвеска работает, как «жесткая» для гашения колебаний при отсутствии изменений рельефа).

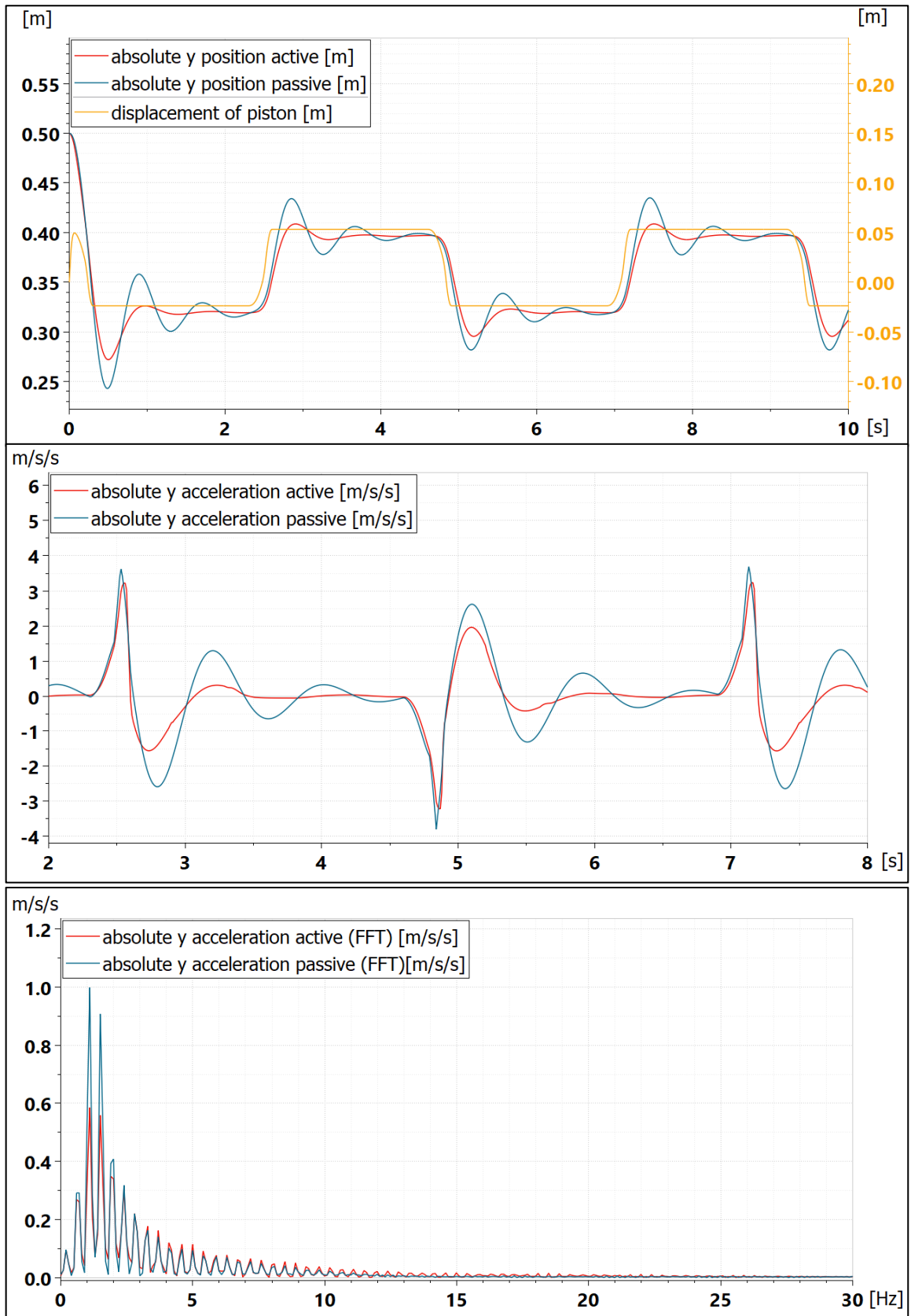


Рисунок 36 – $C = 300 \dots 3000 \frac{H \cdot c}{M}$, амплитуда ВВ = 5 см, частота ВВ = 0,5 Гц

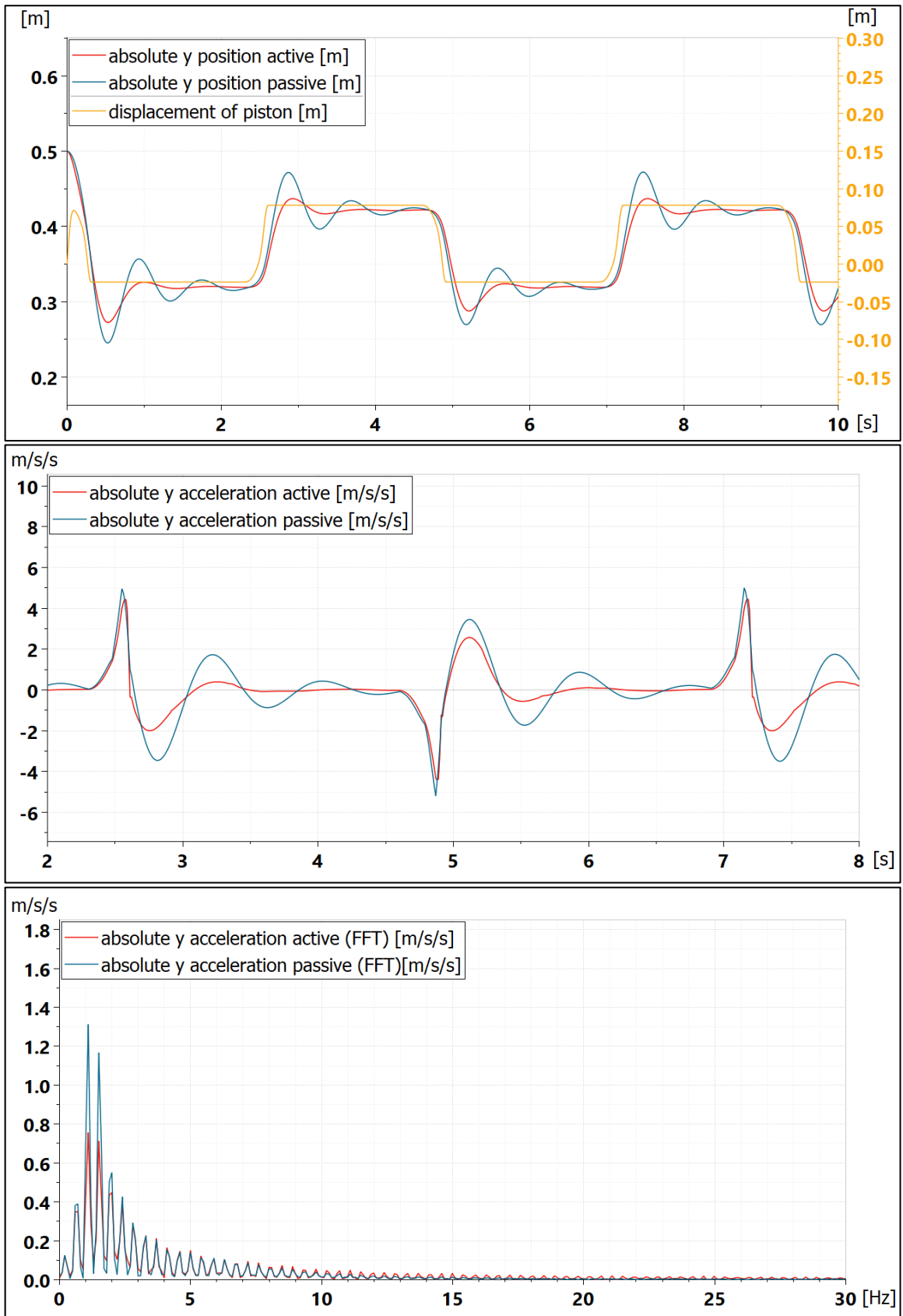


Рисунок 37 – $C = 300 \dots 3000 \frac{H \cdot c}{M}$, амплитуда $BB = 10 \text{ см}$, частота $BB = 0,5 \text{ Гц}$

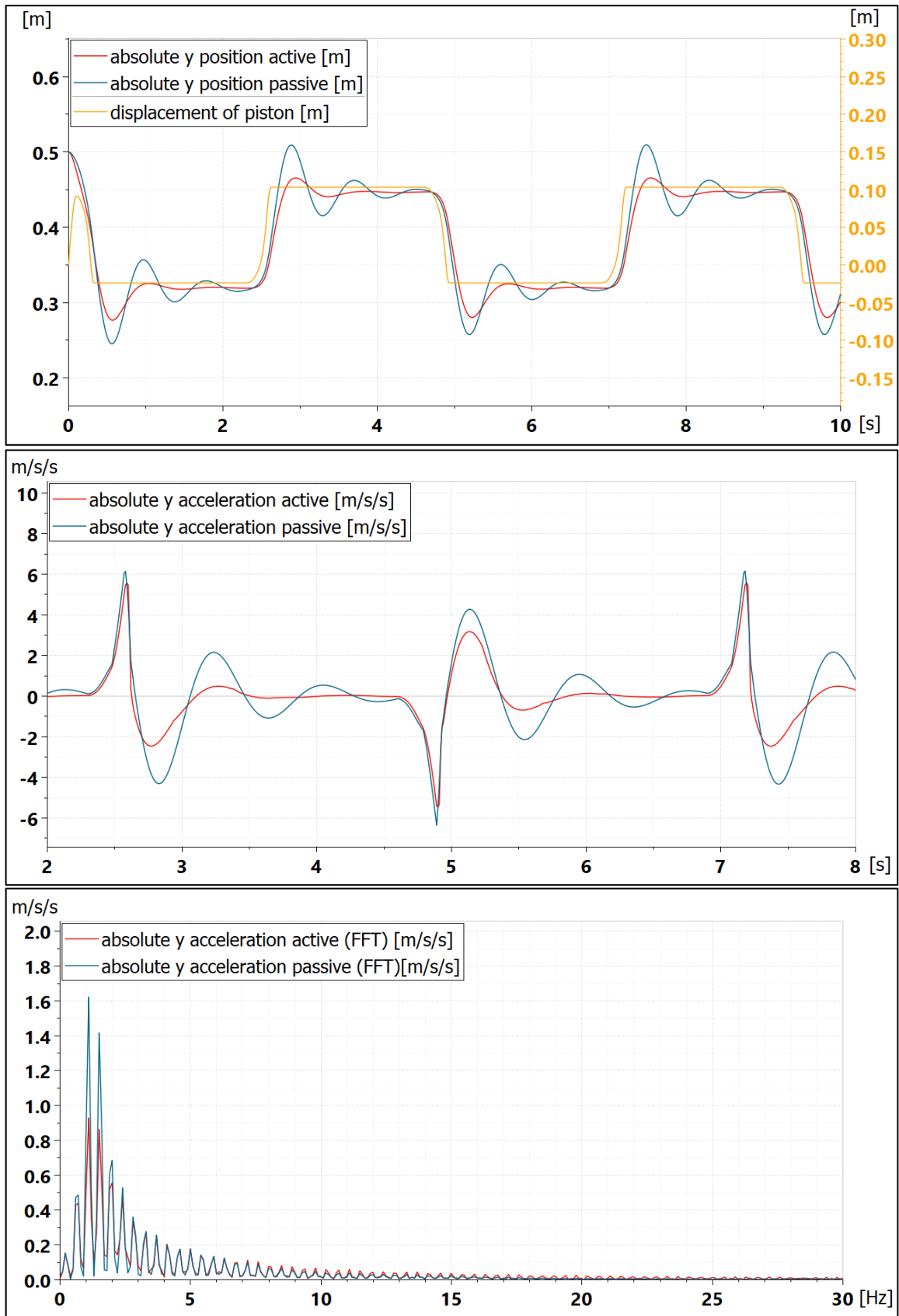


Рисунок 38 – $C = 300 \dots 3000 \frac{H \cdot c}{M}$, амплитуда $BV = 15 \text{ см}$, частота $BV = 0,5 \text{ Гц}$

7.3 Анализ результатов испытаний модели

В результате проведённых трёх серий экспериментов был выявлен наиболее подходящий диапазон регулирования ($300 \dots 3000 \frac{H \cdot c}{M}$), который позволяет добиться не только хорошего демпфирования низкочастотных колебаний поддресоренных частей автомобиля, но и не допускает повышения уровня высокочастотных вибраций, передаваемых на корпус через подвеску. Таким образом, можно сделать вывод о повышении комфорта во время вождения при использовании данной системы.

Также немаловажным фактом является и то, что применение данной системы позволяет повысить безопасность вождения. Помимо снижения утомляемости водителя при движении из-за описанного выше улучшения характеристик демпфирования, на безопасность положительно влияет улучшение сцепления колеса с дорожным покрытием при использовании разработанной системы. Наглядным доказательством тому служат следующие участки графиков ускорений:

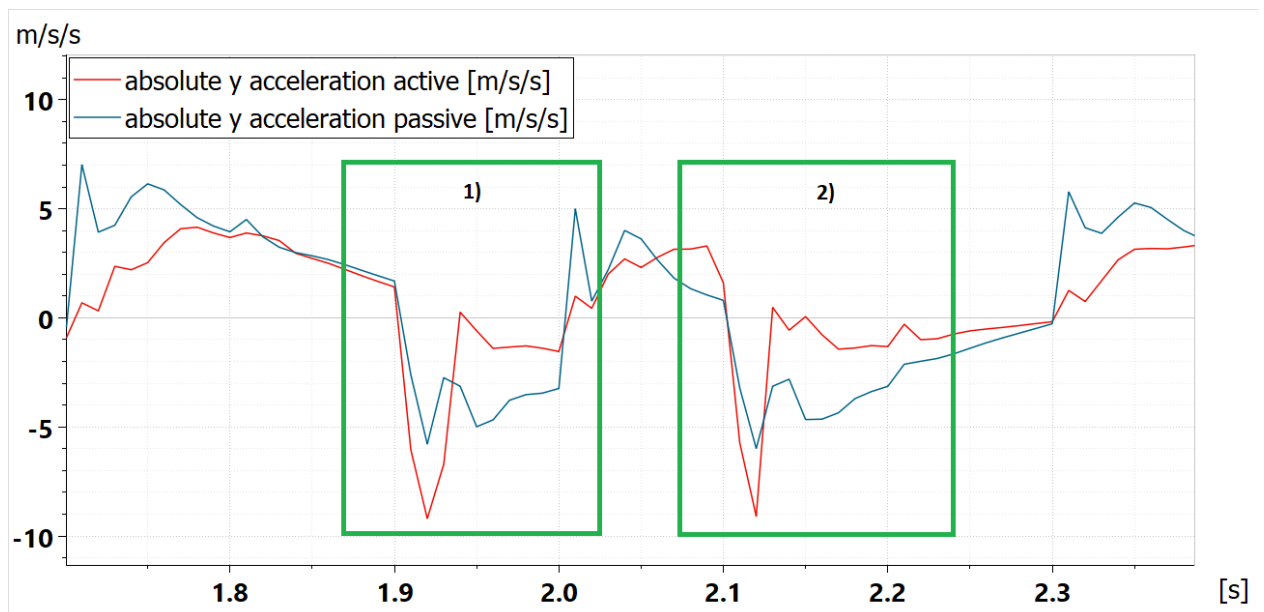


Рисунок 39 – Участки отрыва колеса от дорожного покрытия

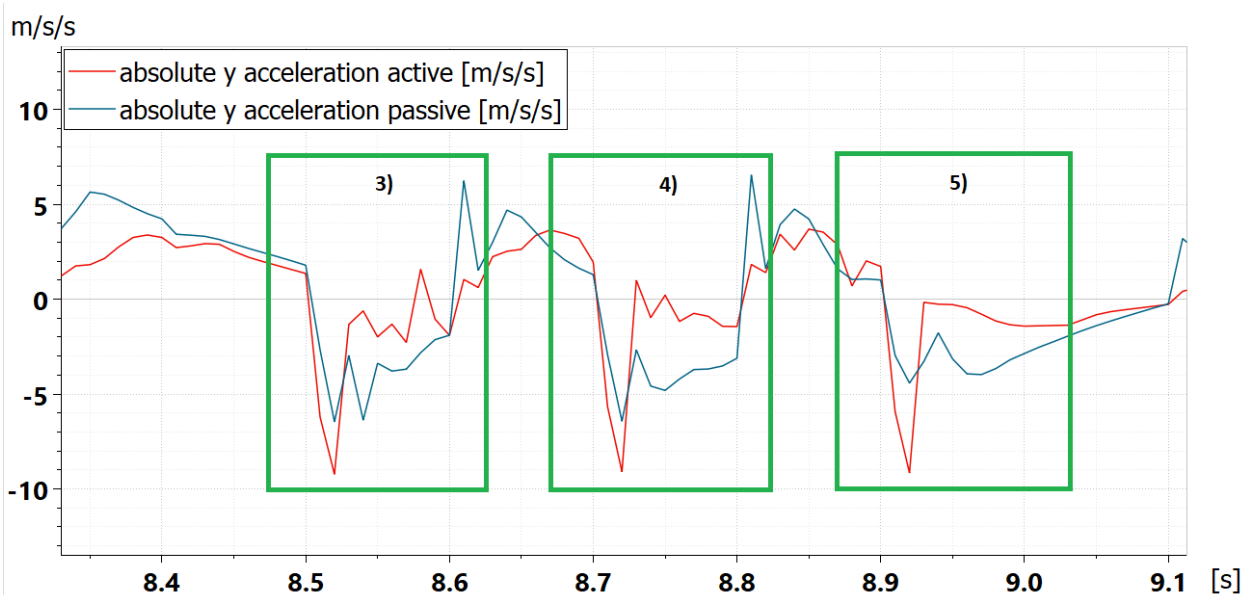


Рисунок 40 – Участки отрыва колеса от дорожного покрытия

Данные участки соответствуют моментам времени, когда колесо автомобиля с адаптивной подвесной системой теряет контакт с дорожным полотном (рисунок 41).

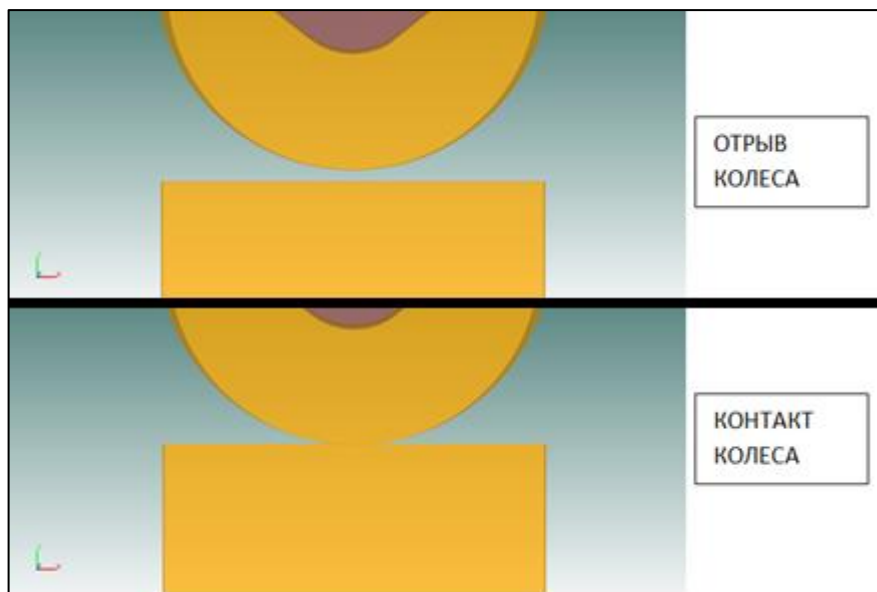


Рисунок 41 – Отрыв колеса и контакт колеса с дорожным покрытием

Об этом свидетельствует величина вертикального ускорения примерно равная ускорению свободного падения. Как видно из графиков, пассивная система имеет меньшее время отрыва колеса, однако дальнейший контакт с

дорожным покрытием слабый, а значит и сила сцепления колеса с дорогой меньше, о чём можно судить по величине ускорения поддресоренных частей. В случае использования адаптивной подвески время отрыва колеса немного больше, однако, восстановленный вновь контакт является более сильным, а, следовательно, больше и сила сцепления колеса с дорожным покрытием, о чём также можно судить по величине ускорения поддресоренных частей.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что система обеспечивает больший комфорт и увеличивает безопасность при движении по сравнению с обычной пассивной подвесной системой автомобиля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной выпускной квалификационной работы была подготовлена вся теоретическая база, необходимая для конструирования автоматизированной системы управления жесткостью подвески автомобиля. Также была создана и успешно скомпилирована программа для контроллера. Помимо этого было проведено моделирование системы в программном пакете Amesim, которое позволило подобрать необходимые коэффициенты для управляющего алгоритма и доказало эффективность разработанной адаптивной системы при всех режимах её работы по сравнению с пассивной подвесной системой. Под эффективностью понимается повышение комфорта и безопасности во время движения автомобиля. Ещё одним важным моментом стало снижение нагрузок, которым подвергаются элементы подвески при использовании разработанной системы. Так, по данным графиков, продемонстрированных в третьей серии экспериментов, пиковые ускорения поддрессоренной массы снизились на 15-17%, при этом сами графики становятся более гладкими, что говорит также о снижении ударных нагрузок.

Результаты данной работы могут быть в дальнейшем использованы для построения разработанной автоматизированной системы управления жесткостью подвески автомобиля, и её установки на транспортное средство. Стоимость данной системы при этом будет аналогична стоимости подобных готовых систем в связи с использованием аналогичной элементной базы, однако, за счёт использования лазерных дальномеров, отсутствующих в других системах, предполагается увеличение эффективности работы системы при больших скоростях движения автомобиля.

В дальнейшем планируется разработка более подробной модели системы, которая будет описывать весь автомобиль в целом и позволит

подбирать конкретные параметры и коэффициенты системы управления для конкретного автомобиля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Лаборатория СТР: как испытывают компоненты для мировых автогигантов [Электронный ресурс]//Статья с сайта DVIZHOK.SU – URL: <https://dvizhok.su/parts/laboratoriya-ctr-kak-ispyityivayut-komponentyi-dlya-mirovyix-avtogigantov> (дата обращения 10.04.2020).

2 Как тестируют подвеску на выносливость A7 FL на заводе [Электронный ресурс]// Статья с сайта DRIVE2.RU – URL: <https://www.drive2.ru/l/539476205875758761/> (дата обращения 10.04.2020).

3 Пат. 2696049 РФ, МПК В60G 11/00. Задняя подвеска колес автомобиля [Текст]/ Новиков В. В., Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Чумаков Д.А.: заявитель и патентообладатель Волгоградский гос. тех. ун-тет. – № 2018134403; заявл. 27.09.2018; опубл. 30.07.2019, Бюл. № 22.

4 Пат. 2711818 РФ, МПК G01M 17/04. Способ определения эффективности действия амортизатора в подвеске автомобиля [Текст]/ Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В.: заявитель и патентообладатель Волгоградский гос. тех. ун-тет. – № 2019112970, заявл. 26.04.2019; опубл. 22.01.2020, Бюл. № 3.

5 Подвеска автомобиля. Виды и типы подвесок автомобиля [Электронный ресурс]//Статья с сайта AUTOMOTOLIFE.COM – URL: <https://automotolife.com/services/podveska-avtomobilya-vidy-i-tipy> (дата обращения 15.04.2020).

6 Don Knowles. Classroom Manual for Automotive Suspension and Steering Systems [Текст]/ Don Knowles. – USA.: Delmar, Cengage Learning, 2011. – 1034с.

7 Основы подвески [Электронный ресурс]//Статья с сайта WEB.ARCHIVE.ORG – URL: <https://web.archive.org/web/20150129143630/http://www.initialdave.com/cars/tech/suspensionbasics02.html> (дата обращения 3.03.2020).

8 Омеличев А. В. Учебник по устройству автомобиля. Издание второе. Исправленное и дополненное [Текст]./ Днепр: Монолит, 2019. – 288с.

9 Causemann, P. CDC (Continuous Damping Control) / P. Causemann, T. Kutschem // VDI-Gesellschaft Fahrzeugund Verkehrstechnik, 1997. – 135-153с.

10 Enrico Pellegrini. Model-Based Damper Control for Semi-Active Suspension Systems [Текст]: дис. ...канд. тех. наук: защищена 27.08.2012.:утв. 18.12.2012/ Enrico Pellegrini. – Мюнхен, 2012. – 196 с.

11 Электронно-управляемые амортизаторы [Электронный ресурс]//Статья с сайта AUTOSCIENCE.RU – URL: [http://www.autoscience.ru/blog/ehlektronno upravljaemye amortizatory/2016-11-24-101](http://www.autoscience.ru/blog/ehlektronno_upravljaemye_amortizatory/2016-11-24-101) (дата обращения 25.04.2020).

12 Алюков А. С. Совершенствование оценки вибронагруженности транспортного средства за счет уточнения описания рабочих характеристик адаптивной подвески [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.05.03., защищена 3.06.19.: утв. 20.09.19/ Алюков Александр Сергеевич. – Челябинск, 2019. – 141с.

13 Service Training. Audi TT Coupe 07. Ходовая часть [Текст]./Программа самообучения компании Audi. 2007. – 47с.

14 Замена адаптивных амортизаторов Range Rover Evoque на обычные [Электронный ресурс]//Статья с сайта SP-LR.RU – URL: <https://sp-lr.ru/evoque/podveska/zamena-adaptivnyh-amortizatorov-range-rover-evoque-na-obysnyue> (дата обращения 15.04.2020).

15 Адаптивная подвеска [Электронный ресурс]//Статья с сайта SYSTEMSAUTO.RU – URL: http://systemsauto.ru/pendant/adaptive_chassis.html (дата обращения 17.03.2020).

16 Service Training. Система адаптивного управления ходовой части DCC [Текст]./Программа самообучения компании Volkswagen. 07.05.2011. – 31с.

17 Система регулировки жёсткости амортизаторов EDC III [Электронный ресурс]//Статья с сайта DRIVE2.RU – URL: <https://www.drive2.ru/l/9900979/> (дата обращения 28.03.2020).

18 Активная подвеска [Электронный ресурс]//Статья с сайта EN.WIKIPEDIA.ORG – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Active_suspension (дата обращения 4.04.2020).

19 Тест передних газовых амортизаторов ВА3 от Bilstein, Sachs, Monroe, KYB-Kayaba [Электронный ресурс]//Статья с сайта AUTOPARAD.RU – URL: <http://www.autoparad.ru/publication/full.php?aid=167> (дата обращения 1.05.2020).

20 Амортизаторы и виброгасители на автомобиле [Электронный ресурс]//Статья с сайта PRESS.OCENIN.RU – URL: http://press.ocenin.ru/amortizatory-i-vibropoglotiteli/#h_744606766111550045959601 (дата обращения 10.03.2020).

21 Performance Analysis of Skyhook, Groundhook and Hybrid Control Strategies on Semi-active Suspension System [Текст]: материалы конференции «International Conference on Automotive Technology» : 28.09.2013: Ansar Mulla, Deepak Rajendra Unune. – Индия, 2013. – 7с.

22 Cost-Effective Skyhook Control for Semi-active Vehicle Suspension Applications [Текст]./ Статья из научного журнала «The Open Mechanical Engineering Journal»: автор Xubin Song: USA, 2009 – 9с.

23 General Theory of Skyhook Control and Its Application to Semi-Active Suspension Control Strategy Design [Текст]./ Статья из научного журнала «IEEE Access»: авторы Changning Liu, Long Chen, Xiaofeng Yang, Xiaoliang Zhang, And Yi Yang: China, 28.06.2019 – 9с.

24 Sky-hook control of nonlinear quarter car model traversing rough road matching performance of LQR control [Текст]./ Статья из журнала «Journal of Sound and Vibration»: авторы V. Gopala Rao, S. Narayanan: Индия, 2009. – 16с.

25 ГОСТ 2.702-2011. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Правила выполнения электрических схем [Текст]. – Введён 01.01.2012 – М.: Издательство стандартов, 2011. – 39с.

26 Data Sheet of AFBR-S50MV85G Time-of-Flight Sensor Module for Distance and Motion Measurement [Электронный ресурс]./Спецификация устройства с сайта BROADCOM.COM – URL: <https://docs.broadcom.com/doc/AFBR-S50MV85G-DS> (дата обращения 30.04.2020).

27 Хусаинов А.Ш., Селифонов В.В. Теория автомобиля: Конспект лекций [Текст]./ Хусаинов А.Ш., Селифонов В.В. : Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 121с.

28 Дэс Хаммилл ПОДВЕСКА И ТОРМОЗА. Как построить и модифицировать спортивный автомобиль.[Текст] / Перевод с английского. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 96с.

29 СТО 02068410-004-2018. Общие требования к учебным текстовым документам [Текст].– Самара: СНИУ, 2018. - 36с.

30 Адаптивная подвеска [Электронный ресурс]//Презентация с сайта PPT-ONLINE.ORG – URL: <https://ppt-online.org/335166> (дата обращения 14.02.2020).

31 Амортизатор [Электронный ресурс]// Раздел журнала "АвтоСпециалист+" с сайта APPO-JURN.NAROD.RU – URL: http://appo-jurn.narod.ru/olderfiles/1/Nemecckii_podveska_k_pechati_05.pdf (дата обращения 23.02.2020).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1 – Патентный обзор

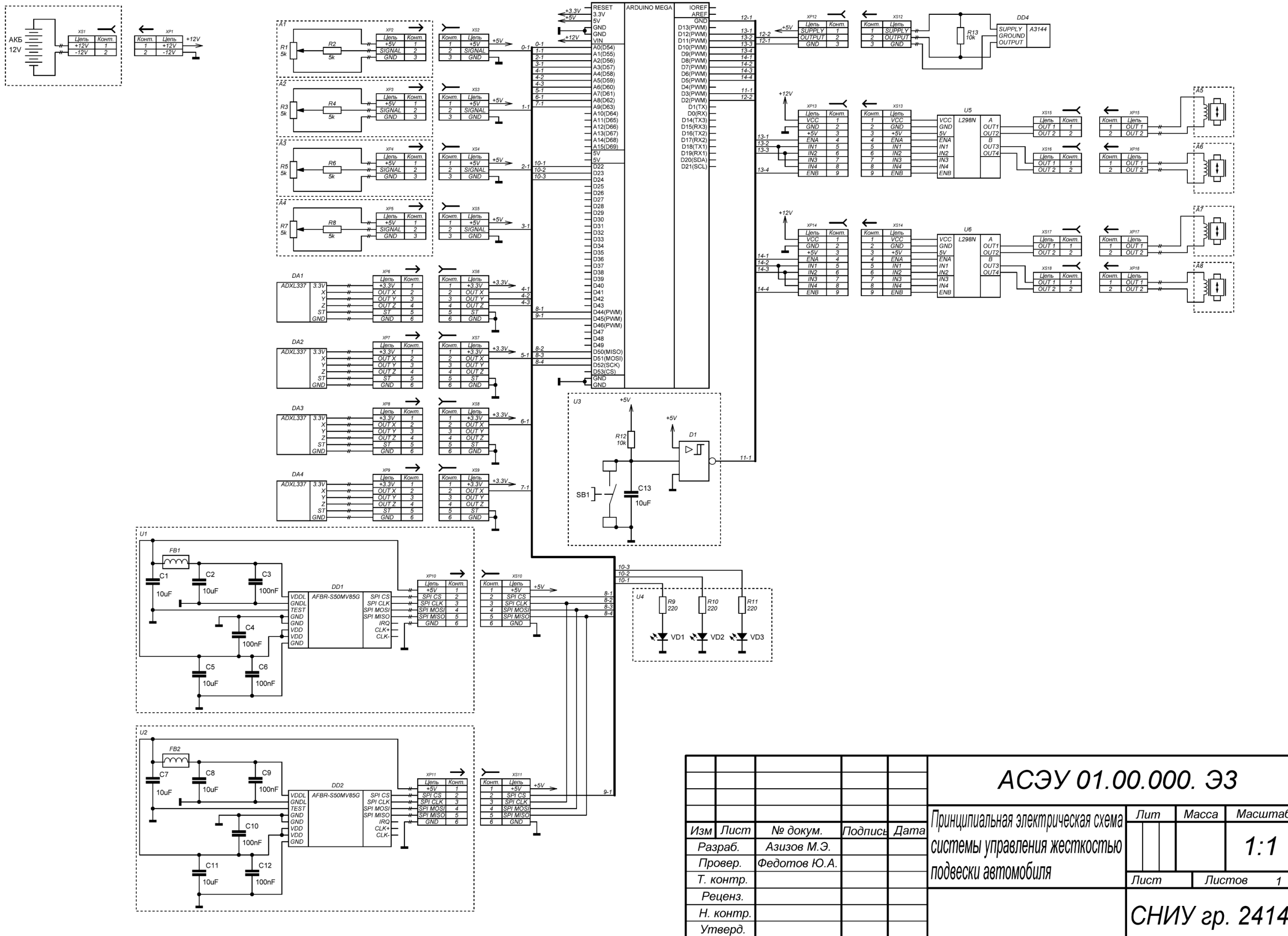
Предмет поиска	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата публикации	Название изобретения
1	2	3	4
Системы управления адаптивной подвеской	РФ RU 2114745 C1 МПК: B60G 3/00; B60G 13/08;	Заявитель: Титов Сергей Владимирович Номер заявки: 95105003/28 Дата публикации: 10.07.1998 Дата подачи: 31.03.1995	Адаптивная подвеска
	РФ RU 2707483 C2 МПК: B60G 17/00; B60W 40/068; G01W 1/00;	Заявитель: ФОРД ГЛОУБАЛ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ЭлЭлСи (US) Номер заявки: 2016103407 Дата публикации: 26.11.2019 Дата подачи: 03.02.2016	Усовершенствованное определение характеристик дороги для адаптивного режима вождения
	РФ RU 2718181 C2 МПК: B60G 17/0165;	Заявитель: ФОРД ГЛОУБАЛ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ЭлЭлСи (US) Номер заявки: 2016119748 Дата публикации: 31.03.2020 Дата подачи: 23.05.2016	Транспортное средство
	РФ RU 2568163 C1 МПК: B60G 17/0195;	Заявитель: НИССАН МОТОР КО., ЛТД. (JP) Номер заявки: 2014150608/11 Дата публикации: 10.11.2015 Дата подачи: 13.05.2013	Устройство управления транспортного средства и способ управления транспортным средством

1	2	3	4
	<p>РФ RU 2568048 C1 МПК: B60G 17/015;</p>	<p>Заявитель: НИССАН МОТОР КО., ЛТД. (JP) Номер заявки: 2014150557/11 Дата публикации: 10.11.2015 Дата подачи: 13.05.2013</p>	<p>Устройство управления транспортного средства и способ управления транспортным средством</p>
	<p>РФ RU 2395407 C2 МПК: B60G 23/00;</p>	<p>Заявитель: ТОЙОТА ДЗИДОСЯ КАБУСИКИ КАЙСЯ (JP) Номер заявки: 14164631.5 Дата публикации: 27.07.2010 Дата подачи: 06.03.2007</p>	<p>Система подвески транспортного средства</p>
	<p>РФ RU 2456170 C2 МПК: B60G 17/015;</p>	<p>Заявитель: ТОЙОТА ДЗИДОСЯ КАБУСИКИ КАЙСЯ (JP), КАЯБА ИНДАСТРИ КО., ЛТД. (JP) Номер заявки: 2010141817/11 Дата публикации: 20.07.2012 Дата подачи: 08.05.2009</p>	<p>Система подвески транспортного средства</p>
	<p>РФ RU 2493987 C2 МПК: B60W 30/02;</p>	<p>Заявитель: ТОЙОТА ДЗИДОСЯ КАБУСИКИ КАЙСЯ (JP) Номер заявки: 2011117271/11 Дата публикации: 27.09.2013 Дата подачи: 06.10.2009</p>	<p>Система управления амортизацией подрессоренной массы транспортного средства</p>
	<p>РФ RU 2499687 C1 МПК: B60G 21/00;</p>	<p>Заявитель: Елецкий государственный университет (RU) Номер заявки: 2012114350/11 Дата публикации: 27.11.2013 Дата подачи: 11.04.2012</p>	<p>Адаптивная независимая подвеска</p>

1	2	3	4
	<p>РФ RU 2700290 C2 МПК: B60G 15/04; B60G 17/015; B60G 17/08; F16F 9/10; F16F 9/50;</p>	<p>Заявитель: ХИТАЧИ ОТОМОУТИВ СИСТЕМС, ЛТД. (JP) Номер заявки: 2015131631 Дата публикации: 16.09.2019 Дата подачи: 29.07.2015</p>	<p>Транспортное средство, оборудованное амортизатором</p>
	<p>РФ RU 175044 U1 МПК: F16F 9/53;</p>	<p>Заявитель: Найгерт Катарина Валерьевна (RU), Тутынин Валерий Тимофеевич (RU) Номер заявки: 2017130606 Дата публикации: 20.11.2017 Дата подачи: 29.08.2017</p>	<p>Адаптивный комбинированный реологический амортизатор</p>
	<p>РФ RU 2479766 C1 МПК: F16F 9/16; F16F 9/34; F16F 9/50;</p>	<p>Заявитель: Южно-Уральский государственный университет (RU) Номер заявки: 2011137582/11 Дата публикации: 20.04.2013 Дата подачи: 12.09.2011</p>	<p>Адаптивный амортизатор подвески транспортного средства</p>
	<p>РФ RU 2474739 C1 МПК: F16F 9/16; F16F 9/34; F16F 9/50;</p>	<p>Заявитель: Южно-Уральский государственный университет (RU) Номер заявки: 2011137582/11 Дата публикации: 10.02.2013 Дата подачи: 19.10.2011</p>	<p>Адаптивный амортизатор подвески транспортного средства</p>
	<p>Япония JP5503328B2 МПК: --</p>	<p>Заявитель: Honda Motor Co., Ltd. (JP) Номер заявки: JP2010037570A Дата публикации: 28.05.2014 Дата подачи: 23.02.2010</p>	<p>Устройство управления демпфирующей силой регулируемого демпфера (перевод)</p>

1	2	3	4
	РФ RU 2497692 C2 МПК: B60G 17/015;	Заявитель: ДЖИ ЭМ ГЛОУБАЛ ТЕКНОЛОДЖИ ОПЕРЕЙШНЗ, ИНК. (US) Номер заявки: 2009112078/11 Дата публикации: 10.11.2013 Дата подачи: 01.04.2009	Адаптивное управление подвеской транспортного средства
	РФ RU 2575368 C1 МПК: B60G 17/0195;	Заявитель: НИССАН МОТОР КО., ЛТД. (JP) Номер заявки: 2014142695/11 Дата публикации: 20.02.2016 Дата подачи: 02.11.2012	Устройство и способ для управления транспортным средством
	Китай CN108891220A МПК: B60G 17/0157; B60G 17/018; B60G 17/01908; B60G 2400/10; B60G 2800/20;	Заявитель: Университет Яншань (CN) Номер заявки: CN201810797044.XA Дата публикации: 27.11.2018 Дата подачи: 19.07.2018	Усовершенствованный алгоритм управления Skyhook для полуактивной системы подвески автомобиля (перевод)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



АСЭУ 01.00.000. Э3

Принципиальная электрическая схема системы управления жесткостью подвески автомобиля

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Азизов М.Э.		
Провер.		Федотов Ю.А.		
Т. контр.				
Реценз.				
Н. контр.				
Утверд.				

Лит	Масса	Масштаб
		1:1
Лист	Листов	1

СНИУ гр. 2414

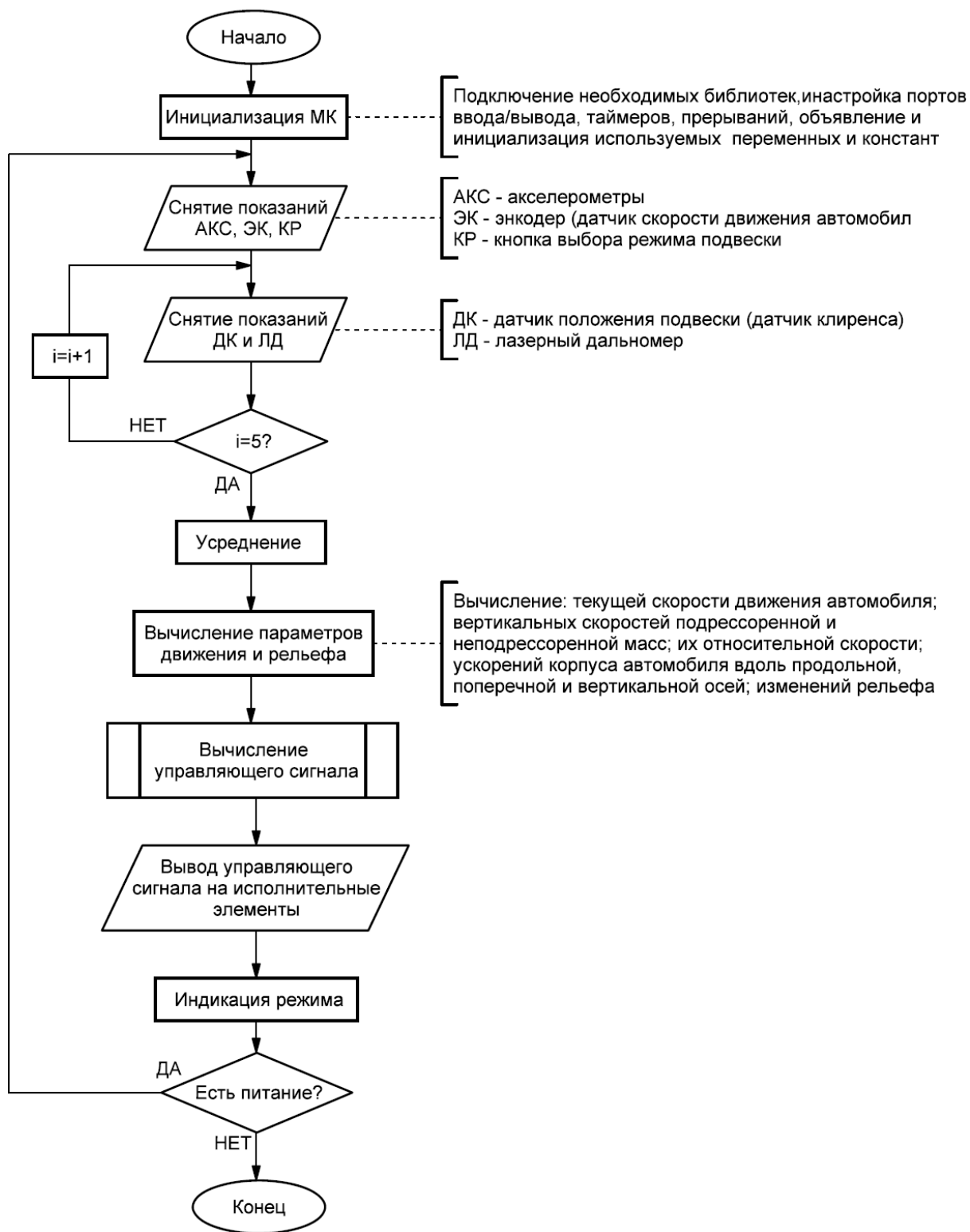
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Поз. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
	<u>Резисторы</u>		
R1...R8	Внутренние сопротивления датчиков клиренса		
	SP-1600, 5кОм±1%	8	
R9...R11	MF-25 (C2-23) 0,25 Вт, 220 Ом±1%	3	
R12, R13	MF-25 (C2-23) 0,25 Вт, 10 кОм±1%	2	
	<u>Конденсаторы</u>		
C3,C4,C6	Кер. чип. конд. 100нФ±10%, 16В, 0603 X7R	3	
C9,C10,C12	Кер. чип. конд. 100нФ±10%, 16В, 0603 X7R	3	
C1,C2,C5,C7	Конд. тантал. 10 мкФ±10%, 16 В, SMD TECAP	4	
C8,C11, C13	Конд. тантал. 10 мкФ±10%, 16 В, SMD TECAP	3	
	<u>Индуктивности</u>		
FB1,FB2	Ферритовая шайба Murata BLM18HE152SN1D		
	сопротивление 1,5кОм±25% при 100МГц, 100мА	2	
	<u>Диоды</u>		
VD1...VD3	Светодиод зелёный 60° d=3мм, GNL-3012GD	3	
	<u>Микросхемы</u>		
D1	Инв. триггер Шмитта 5V, SN74LVC1G17DBVR	1	
	<u>Кнопки</u>		
SB1	Кнопка 6x6мм	1	
	<u>Модули в сборе</u>		
DD3	Плата Arduino Mega 2560	1	
U5,U6	Модуль с драйвером L298N ST	2	

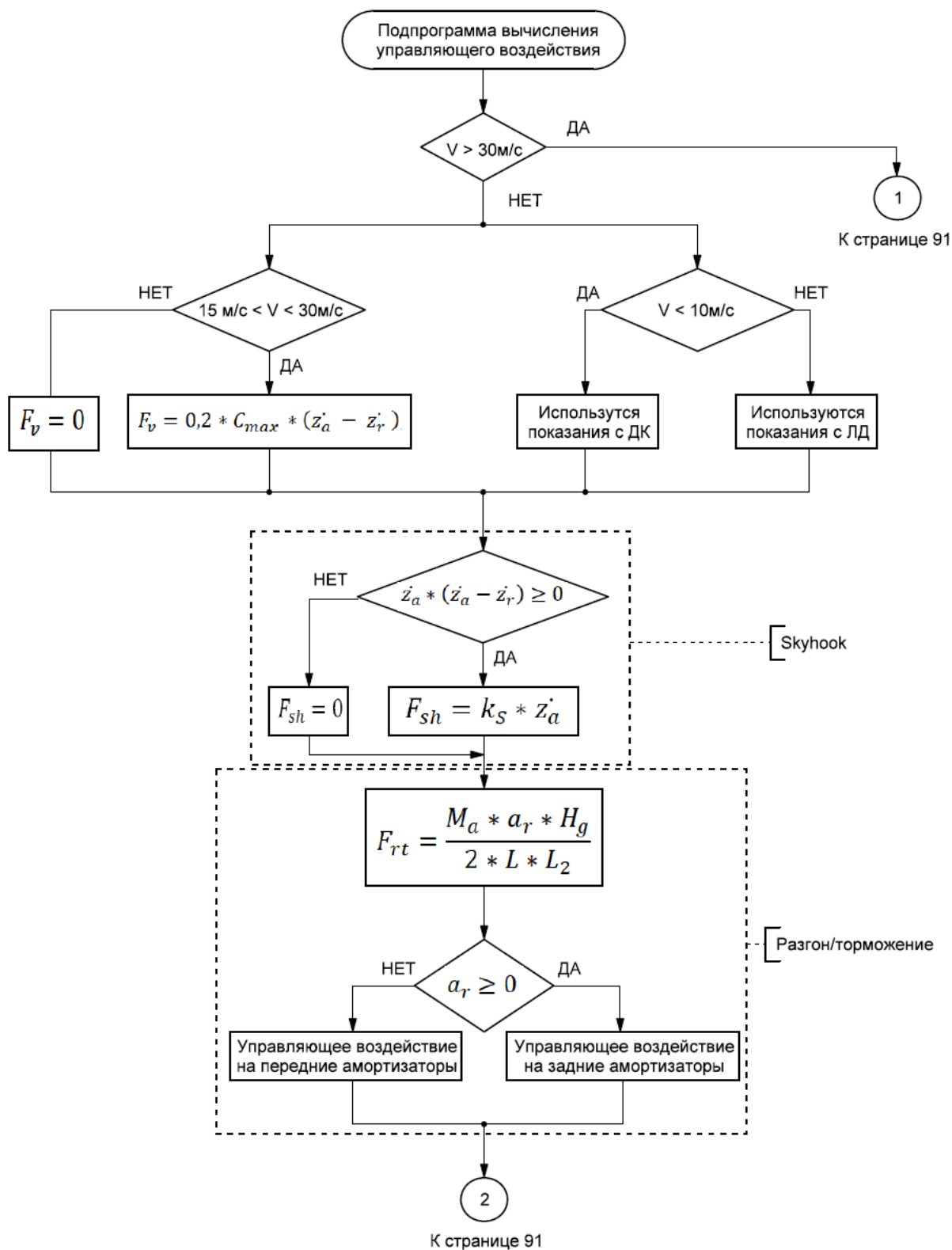
					АСЭУ 2414.15.03.04.D		
					Система управления жесткостью подвески автомобиля.		
					Перечень элементов		
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	Масса	Масштаб
Разраб.							1:1
Провер.							
Т. контр.					Лист 1	Листов 2	
Реценз.	Азизов М.Э.				СНИУ гр. 2414		
Н. контр.	Федотов Ю.А.						
Утверд.							

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

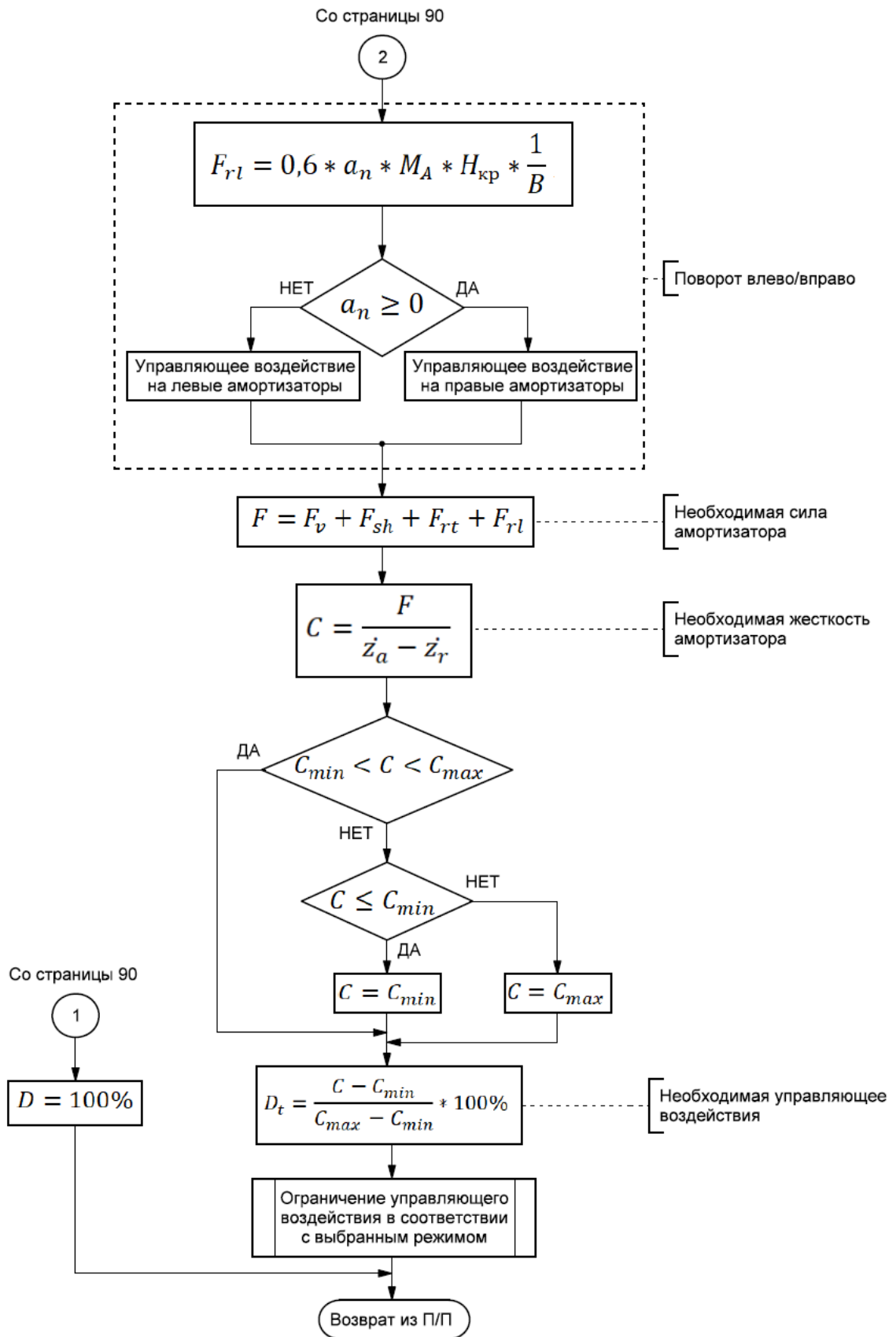
Алгоритм работы системы



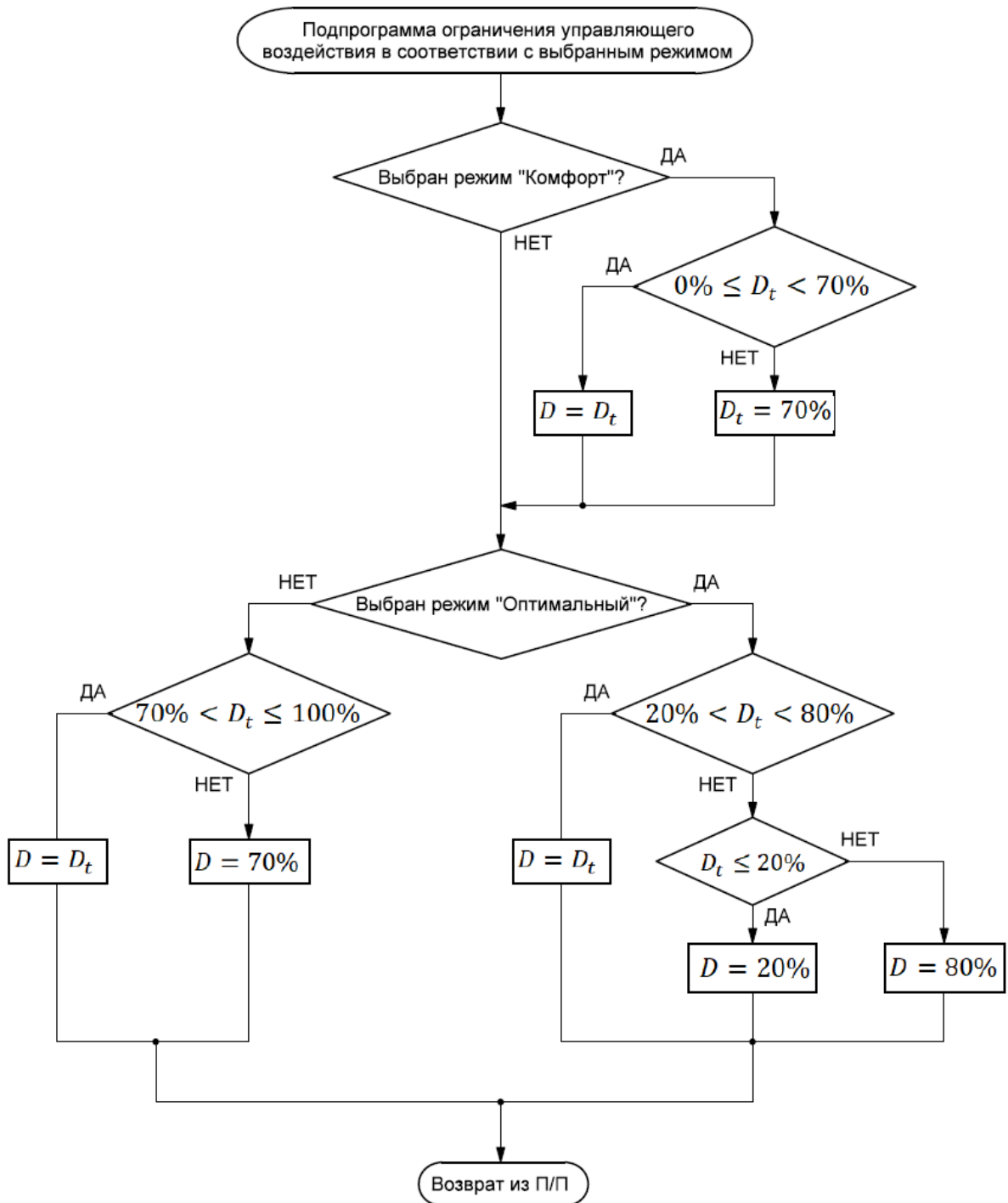
Подпрограмма вычисления управляющего воздействия



Подпрограмма вычисления управляющего воздействия



Подпрограмма ограничения управляющего воздействия в соответствии с
выбранным режимом



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Листинг программы для микроконтроллера

```
//Подключение необходимых библиотек
#include <SPI.h>
/*-----*/
//присвоение имён входам и выходам контроллера
//Датчики клиренса
#define DK1 0
#define DK2 1
#define DK3 2
#define DK4 3
//Акселерометры
#define AKS1X 4
#define AKS1Y 5
#define AKS1Z 6
#define AKS2 7
#define AKS3 8
#define AKS4 9
//Лазерные дальномеры
#define LD1 44
#define LD2 45
//Кнопка переключения режимов
#define кнопка 1
//Датчик скорости
#define DS 2
//Индикатор режима
#define soft 22
#define mid 23
#define hard 24
//Исполнительные элементы
#define in1 11
#define in2 10
#define in3 7
#define in4 6
#define k1 12
#define k2 9
#define k3 8
#define k4 5
/*-----*/
//Константы, для корректной работы системы
const int mA = 1300; //масса автомобиля
const int r = 16; //радиус колес в дюймах
const float L = 2; //расстояние между осями автомобиля
const float L2 = 0.7; //расстояние от передних колёс до центра масс
const float B = 1.3; //расстояние между колесами одной оси
const float Hg = 0.6; //высота центра масс автомобиля
const float Hkr = 0.6; //расстояние от центра крена до центра масс
const int Cmin = 300; //минимальная жесткость амортизатора
const int Cmax = 3000; //максимальная жесткость амортизатора
const int ks = 2000; //жесткость амортизатора Skyhook
/*-----*/
//Объявление глобальных переменных
int an,ar,aZA1,aZA2,aZA3,aZA4; //Ускорения
```



```

float sZA1,sZA2,sZA3,sZA4,sZR1,sZR2,sZR3,sZR4; //Вертикальные скорости
int Z_1,Z_2,Z_3,Z_4,OZ_1,OZ_2,OZ_3,OZ_4; //Относительные перемещения
float ZLD1,ZLD2,OZLD1,OZLD2; //Расстояние от лазерных дальномеров
float sZLD1,sZLD2; //Скорости от дальномеров
uint8_t byte_0,byte_1; //Байты для чтения по SPI
uint16_t dataSPI; //Окончательное значение, принятое по SPI
unsigned long timer; //Переменная для хранения времени
//Составляющие необходимой силы демпфера:
float Fv,Fsh1,Fsh2,Fsh3,Fsh4,Frt12,Frt34,Frl13,Frl24;
float F1,F2,F3,F4; //Рассчитанные силы демпферов
//Рассчитанная жесткость и скважность ШИМ:
float D1,D2,D3,D4,C1,C2,C3,C4;
/*-----*/
//Объявление переменных для обработчиков прерываний
volatile int rej = 2; //режим подвески
volatile float V = 0; //скорость авто
volatile unsigned long timer_s = 0; //Переменная для хранения времени
/*-----*/
//инициализация МК
void setup(){
  //настройка портов на ввод/вывод
  pinMode(LD1,OUTPUT);
  digitalWrite(LD1,HIGH);
  pinMode(LD2,OUTPUT);
  digitalWrite(LD2,HIGH);
  pinMode(soft,OUTPUT);
  pinMode(mid,OUTPUT);
  pinMode(hard,OUTPUT);
  pinMode(in1,OUTPUT);
  digitalWrite(in1,HIGH);
  pinMode(in2,OUTPUT);
  digitalWrite(in2,LOW);
  pinMode(in3,OUTPUT);
  digitalWrite(in3,HIGH);
  pinMode(in4,OUTPUT);
  digitalWrite(in4,LOW);
  pinMode(k1,OUTPUT);
  pinMode(k2,OUTPUT);
  pinMode(k3,OUTPUT);
  pinMode(k4,OUTPUT);
  attachInterrupt(0, rejim, FALLING);
  attachInterrupt(1, sp, FALLING);
  SPI.setDataMode(SPI_MODE3);
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16);
  SPI.begin();
}
/*-----*/
//подпрограмма считывания показаний датчиков
void pokaz(){
  //показания акселерометров
  int X1 = analogRead(AKS1X);
  int Y1 = analogRead(AKS1Y);
  int ZA1 = analogRead(AKS1Z);
  an = map(X1,0,675,-3,3);
  ar = map(Y1,0,675,-3,3);
  aZA1 = map(ZA1,0,675,-3,3);
}

```

```

int ZA2 = analogRead(AKS2);
int ZA3 = analogRead(AKS3);
int ZA4 = analogRead(AKS4);
aZA2 = map(ZA2,0,675,-3,3);
aZA3 = map(ZA3,0,675,-3,3);
aZA4 = map(ZA4,0,675,-3,3);
//показания ДК
OZ_1 = Z_1;
OZ_2 = Z_2;
OZ_3 = Z_3;
OZ_4 = Z_4;
Z_1 = 0;
Z_2 = 0;
Z_3 = 0;
Z_4 = 0;
for (int i=0; i<=4; i++)
{
  int z0_1 = analogRead(DK1);
  int z0_2 = analogRead(DK2);
  int z0_3 = analogRead(DK3);
  int z0_4 = analogRead(DK4);
  int xz1 = map(z0_1,0,1023,0,100);
  int xz2 = map(z0_2,0,1023,0,100);
  int xz3 = map(z0_3,0,1023,0,100);
  int xz4 = map(z0_4,0,1023,0,100);
  Z_1 = Z_1 + xz1;
  Z_2 = Z_2 + xz2;
  Z_3 = Z_3 + xz3;
  Z_4 = Z_4 + xz4;
}
Z_1 = Z_1/5;
Z_2 = Z_2/5;
Z_3 = Z_3/5;
Z_4 = Z_4/5;
//показания лазерных дальномеров
OZLD1 = ZLD1;
OZLD2 = ZLD2;
ZLD1 = 0;
ZLD2 = 0;
for (int i=0; i<=4; i++)
{
  digitalWrite(LD1,LOW);
  byte_0 = SPI.transfer(0);//чтение первого байта по SPI
  byte_1 = SPI.transfer(0);//чтение второго байта по SPI
  digitalWrite(LD1,HIGH);
  dataSPI = byte_0 + byte_1; //формирование значения, принятого по SPI
  ZLD1 = ZLD1 + 5*(float(dataSPI)/2048.0);//показания 1 дальномера
  digitalWrite(LD2,LOW);
  byte_0 = SPI.transfer(0);//чтение первого байта по SPI
  byte_1 = SPI.transfer(0);//чтение второго байта по SPI
  digitalWrite(LD2,HIGH);
  dataSPI = byte_0 + byte_1; //формирование значения, принятого по SPI
  ZLD2 = ZLD2 + 5*(float(dataSPI)/2048.0);//показания 2 дальномера
}
ZLD1 = ZLD1/5;//усредненные показания 1 дальномера
ZLD2 = ZLD2/5;//усредненные показания 2 дальномера
}

```

```

/*-----*/
//подпрограмма обработки прерывания от кнопки переключения режима
void rejim(){
    if(rej == 3)rej = 1;
    else rej++;
}
/*-----*/
//подпрограмма обработки прерывания от датчика скорости
void sp(){
    V = 2*3.14*r*2.5/(timer_s - micros())*1000000;//вычисление скорости
    timer_s = micros();//сохранение времени отсчёта
}
/*-----*/
//подпрограмма вычисления вертикальных скоростей
void math(){
    unsigned long t = timer - micros();
    sZA1 = sZA1 + aZA1*t/1000000;
    sZA2 = sZA2 + aZA2*t/1000000;
    sZA3 = sZA3 + aZA3*t/1000000;
    sZA4 = sZA4 + aZA4*t/1000000;
    sZR1 = sZA1-(Z_1-OZ_1)/t*1000000;
    sZR2 = sZA2-(Z_2-OZ_2)/t*1000000;
    sZR3 = sZA3-(Z_3-OZ_3)/t*1000000;
    sZR4 = sZA4-(Z_4-OZ_4)/t*1000000;
    sZLD1 = (ZLD1-OZLD1)/t*1000000;
    sZLD2 = (ZLD2-OZLD2)/t*1000000;
    timer = micros();
}
/*-----*/
//подпрограмма обрезания управляющего сигнала
//в соответствии с выбранным режимом
void obrez(){
    if(rej==1){
        D1 = constrain(D1,0,70);
        D2 = constrain(D2,0,70);
        D3 = constrain(D3,0,70);
        D4 = constrain(D4,0,70);
    }
    else if(rej==2){
        D1 = constrain(D1,20,80);
        D2 = constrain(D2,20,80);
        D3 = constrain(D3,20,80);
        D4 = constrain(D4,20,80);
    }
    else {
        D1 = constrain(D1,70,100);
        D2 = constrain(D2,70,100);
        D3 = constrain(D3,70,100);
        D4 = constrain(D4,70,100);
    }
}
/*-----*/
//подпрограмма вывода управляющего сигнала
void out(){
    //управление индикатором текущего режима
    if(rej==1){
        digitalWrite(soft,HIGH);

```

```

    digitalWrite(mid,LOW);
    digitalWrite(hard,LOW);
}
else if(rej==2){
    digitalWrite(soft,LOW);
    digitalWrite(mid,HIGH);
    digitalWrite(hard,LOW);
}
else {
    digitalWrite(soft,LOW);
    digitalWrite(mid,LOW);
    digitalWrite(hard,HIGH);
}
D1 = map(D1,0,100,0,255);
D2 = map(D2,0,100,0,255);
D3 = map(D3,0,100,0,255);
D4 = map(D4,0,100,0,255);
analogWrite(k1,D1);
analogWrite(k2,D2);
analogWrite(k3,D3);
analogWrite(k4,D4);
}
/*-----*/
//Основная программа
void loop(){
    pokaz();
    math();
    if(V>30)
    {
        D1 = 100;
        D2 = 100;
        D3 = 100;
        D4 = 100;
    }
    else{
        //Вычисление составляющей силы Fv
        if(V<=30 && V>=15) Fv = 0.2*Cmax*(sZA1-sZR1);
        else Fv = 0;
        //Вычисление составляющей силы Fsh
        if(V>10)
        { //на скорости выше 10м/с используются показания с дальномеров
            sZR1 = sZLD1;
            sZR2 = sZLD2;
            sZR3 = sZLD1;
            sZR4 = sZLD2;
        }
        if(sZA1*(sZA1-sZR1)>=0)Fsh1 = ks*sZA1;
        else Fsh1 = 0;
        if(sZA2*(sZA2-sZR2)>=0)Fsh2 = ks*sZA2;
        else Fsh2 = 0;
        if(sZA3*(sZA3-sZR3)>=0)Fsh3 = ks*sZA3;
        else Fsh3 = 0;
        if(sZA4*(sZA4-sZR4)>=0)Fsh4 = ks*sZA4;
        else Fsh4 = 0;
        //Вычисление составляющей силы Frt
        if(ar>=0){
            Frt12 = 0;

```

```

    Frt34 = mA*ar*Hg/(2*L*L2);
}
else{
    Frt12 = -mA*ar*Hg/(2*L*L2);
    Frt34 = 0;
}
//Вычисление составляющей силы Fr1
if(an>=0){
    Fr113 = 0;
    Fr124 = 0.6*an*mA*Hkr/B;
}
else{
    Fr113 = -0.6*an*mA*Hkr/B;
    Fr124 = 0;
}
//Вычисление общей силы каждого демпфера
F1 = Fv+Fsh1+Frt12+Fr113;
F2 = Fv+Fsh2+Frt12+Fr124;
F3 = Fv+Fsh3+Frt34+Fr113;
F4 = Fv+Fsh4+Frt34+Fr124;
//Вычисление необходимой жесткости каждого демпфера
C1 = F1/(sZA1-sZR1);
C2 = F2/(sZA2-sZR2);
C3 = F3/(sZA3-sZR3);
C4 = F4/(sZA4-sZR4);
//Ограничение min и max жесткости
C1 = constrain(C1,Cmin,Cmax);
C2 = constrain(C2,Cmin,Cmax);
C3 = constrain(C3,Cmin,Cmax);
C4 = constrain(C4,Cmin,Cmax);
//Вычисление нужной скважности
D1 = (C1-Cmin)/(Cmax-Cmin)*100;
D2 = (C2-Cmin)/(Cmax-Cmin)*100;
D3 = (C3-Cmin)/(Cmax-Cmin)*100;
D4 = (C4-Cmin)/(Cmax-Cmin)*100;
obrez();
out();
}
}

```