

На правах рукописи

Алхелу Мухаммед

**Алгоритмы управления автомобилем по данным наблюдений с учётом
компромисса между степенями демпфирования и управляемости**

Специальность 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматического управления» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

ЛОБУСОВ Евгений Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры систем автоматического
управления МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

МАГОМЕДОВ Магомед Хабибович –
Доктор физико-математических наук, ст.
научный сотрудник каф. «Прикладная
механика и управление» МГУ им.
Ломоносова М.В.

СЕРОВ Владимир Александрович –
кандидат технических наук, доц. МИРЭА
– Российский технологический
университет. Каф. Прикладные
информационные технологии.

Ведущая организация:

ФГАОУ ВПО НИУ «ВШЭ»
Московский институт электроники и
математики (МИЭМ)

Защита состоится «14» марта 2023 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ Н.Э. Баумана и на сайте <https://www.bmstu.ru/>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « » 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

И. В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение

Система подвески изолирует кузов транспортного средства от дорожных ударов и вибраций, которые в противном случае передавались бы полезному грузу (водителю или пассажирам), а также должна поддерживать контакт шин с дорогой. Таким образом, система подвески является важным элементом, обеспечивающим качественное управление движением автомобиля.

В целом система подвески обеспечивает выполнение трёх основных функций: степень демпфирования (или комфорт) позволяет при движении изолировать полезный груз или пассажиров от дорожных помех; удержание на дороге – предполагает максимальный контакт колеса с дорогой; степень управляемости - в общем смысле это среднее состояние между степенью демпфирования (комфортом) и удержанием на дороге.

Подвеска состоит из 2-х основных частей: неподрессоренной и подрессоренной частей (масс).

Неподрессоренная масса включает в себя компоненты, которые следуют контурам дороги- колеса, шины, тормозные узлы и любая часть рулевого управления и подвески, не поддерживаемая пружинами.

Подрессоренная масса-это часть транспортного средства, поддерживаемая пружинами, такая как кузов, рама, двигатель и связанные с ними детали.

Существует неизбежный компромисс между степенью демпфирования и отклонением подвески из-за того, что положение колеса примерно соответствует профилю дороги на низких частотах ($<5\text{rad/c}$): любое уменьшение хода кузова на этих частотах приведет к увеличению отклонения подвески. Кроме того, хорошая степень демпфирования требует мягкой подвески, а нечувствительность к приложенным нагрузкам (небольшое отклонение подвески) требует жесткой подвески, в то время как хорошая степень управляемости требует установки подвески между ними. Эту проблему часто называют противоречием между степенью управляемости и степенью демпфирования.

Указанные факторы являются противоречивыми и поэтому управление такой системой требует их разрешения.

Для решения подобных задач известно множество подходов управления активной и полуактивной подвеской, в том числе на адаптивном уровне, например, [Koch, G., MAIZZA, G., FRANZ, D.]. Также известны методы текущей подстройки свойств подвески по соотношению «мягкая» – «жесткая» с регулируемым параметром, например, [Caponetto.R., Diamante, O., Fargione, G., Risitano, A., Лобусов Е.С]. Все эти работы были направлены на повышение комфорта, без учета степени управляемости.

В связи с этими обстоятельствами **актуальной задачей** является поиск стратегии управления противоречием между степенью управляемости и степенью демпфирования (комфортом), чтобы достичь максимального комфорта, сохраняя при этом как можно больший контакт колес с дорогой.

Цель диссертационной работы – Создание методов, алгоритмов, программных и технических решений в области совершенствования процессов управления подвеской, направленных на разрешение противоречий между показателями качества движения автомобиля с использованием теории, средств и методов управления по данным наблюдений.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть **следующие задачи:**

1. Проведение сравнительного анализа эффективности существующих алгоритмов с точки зрения основной цели работы;
2. Исследование предлагаемых методов управления по данным наблюдений, и их наиболее важных приложений с точки зрения разрешения компромисса для различных вариантов представления движения объекта управления (от простого к сложному)- подход «снизу вверх», подход «сверху вниз».
3. Проведение моделирование.

В соответствии с целью и задачами диссертационной работы **объектом исследования** является простейшая подвеска типа «четверть автомобиля» в первой части, позволяющая выяснить все важные моменты предлагаемых решений, и во второй части - подвеска типа «полный автомобиль», включая быструю активную подвеску; **предметом исследования** являются алгоритмы, основанные на методах управления по данным наблюдений для улучшения управления противоречиями между степенью управляемости и степенью демпфирования системы подвески автомобиля.

Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов состоит в следующем:

1. Предложен численный критерий степени управляемости для модели «полный автомобиль», отличающийся от прототипа - диаграммы управляемости автомобиля универсальностью, отсутствием необходимости проведения дорогостоящих натурных экспериментов и субъективизма оценок управляемости водителем.
2. Выделены показатели движения автомобиля: спектральная плотность мощности (PSD) и коэффициент динамической нагрузки (DLC), которые предложено использовать для настройки коэффициентов регулятора с целью управления компромиссом между степенью демпфирования и степенью управляемости автомобиля.
3. Разработан алгоритм оптимизации в реальном времени для управления компромиссом между степенью демпфирования и степенью управляемости с использованием методов управления по данным наблюдений. В отличие от аналога управление осуществляется редуцированным вектором состояния, что позволяет экономить вычислительные ресурсы и осуществлять управление автомобилем в реальном времени.
4. Сокращение объема вычислений при нахождении компромисса в режиме реального времени при применении методов управления по данным

наблюдений, более чем на 50% по сравнению с другими подходами (например, с методами прогноза (Model Predictive Control (MPC))).

5. Разработан алгоритм управления компромиссом качественных характеристик автомобиля, обеспечивающий достижение лучшей степени демпфирования и поддержания заданной степени управляемости по сравнению с другими алгоритмами, используемыми для управления компромиссом (например, для автомобилей марки Ford) за счет использования численного критерия степени управляемости переменными состояния модели типа «полный автомобиль».

Практическая ценность диссертационной работы заключается в следующих результатах:

1. Управление компромиссом в ручном режиме с использованием методов управления по данным наблюдений.

2. Адаптивная стратегия планирования изменения параметра закона управления в зависимости от скорости автомобиля (до 70 км/ч) без ограничения на прогиб подвески.

3. Адаптивный полностью автоматизированный алгоритм для управления компромиссом в системе типа «полный автомобиль» (до 70 км/ч) с ограничением на прогиб подвески.

4. Результаты диссертационного исследования были использованы компанией КАМАЗ при полунатурном моделировании, а также при разработке стратегии дальнейшего развития модели динамики подвески автомобиля.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы теории управления, теории цифровой обработки сигналов, линейной алгебры, математического анализа, теории вероятностей, теории фильтрации Калмана, теории прогнозирующего управления, теории адаптивного управления. Экспериментальное исследование выполнялось методом математического моделирования в среде МАТЛАБ, версия R2018a-R2021a.

Положения, выносимые на защиту

1. Предлагаемые стратегии управления, которые основаны на методах, управления по данным наблюдений, которые требуют ограниченной информации о динамике системы и не создают сложностей при реализации.

2. Новые алгоритмы для управления компромиссом между степенью демпфирования и степенью управляемости, требующие изменения только одного параметра или использования адаптивного механизма.

3. Концепцию мониторинга отклонения подвески в режиме реального времени и учёт её влияния, только если отклонение подвески предполагает превышение установленных пределов.

Степень достоверности результатов исследований. Основные результаты, полученные в работе, обоснованы путем моделирования. Помимо этого, эффективность разработанных алгоритмов подтверждена путем

сопоставления соответствующих им характеристик с характеристиками для известных из литературы алгоритмов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на: конференцию XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Москва, 2021 г.); на научных семинарах кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 4 – в изданиях из перечня ВАК РФ и 5 – в изданиях, индексируемых международной базой научного цитирования (Web of Science, Scopus).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из списка сокращений, введения, четырех глав, заключения, рекомендаций и списка литературы. В начале каждой главы дается краткий обзор состояния соответствующих исследований. Общий объем диссертации составляет 138 страниц текста с 73 рисунками и 11 таблицами. Список цитированной литературы из 78 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы исследований, показана ее научная значимость, сформулированы цели работы, представлены сведения о структуре и содержании работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор концепций и технологии подвески автомобиля, включая основные конструкции и типы. Исследование включало основные компоненты системы подвески в дополнение к различным классификациям этих подвесок. Система подвески автомобиля состоит из четырех основных компонентов-механизма, пружины, амортизатора и втулок.

Автомобильные инженеры обычно изучают функции системы подвески по трем важным критериям: комфорт при движении, удержание на дороге, и степень управляемости. **Степень демпфирования (Комфорт)** определяется на основе того, как полезный груз или экипаж реагирует на условия движения транспортного средства. Наиболее распространенная функция подвески - это изоляция кузова автомобиля от дорожных помех. Как правило, качество поездки можно количественно оценить по уровню вибрации кузова. **Удержание на дороге-** Силы, действующие в точке контакта колеса с дорогой, воздействуют на кузов автомобиля через систему подвески. Другая функция подвески заключается в поддержании статического веса автомобиля. Эта задача выполняется хорошо, если требования к прогибу подвески в транспортном средстве минимальны. **Степень Управляемости-** Показывает, насколько гибко автомобиль реагирует на команды водителя. Хорошая система подвески должна обеспечивать устойчивость автомобиля при каждом маневре и должно реагировать на входные сигналы водителя пропорционально, плавно следуя его командам.

Системы подвески можно классифицировать в зависимости от того, как они взаимодействуют с автомобилем, обеспечивая управляемость и изоляцию от вибрации. В частности, их можно отличить по возможности или отсутствию создания активной силы, т. е. генерирования и введения энергии в систему, а также по наличию электронного управления для их приведения в действие. Согласно этой классификации подвески можно разделить на пассивные, полуактивные и активные. **Пассивные системы подвески**, как правило, состоят из чисто механических элементов, таких как пружины и амортизаторы. **Полуактивные подвески** представляют собой шаг вперед по сравнению с пассивными. Такого рода системы состоят не только из чисто пассивных механических компонентов, но, в дополнение, из регулируемого привода. Принцип работы этой системы заключается в регулировке коэффициента демпфирования привода для изменения вклада силы демпфирования. **Системы активной подвески** отличаются от других типов подвески наличием привода с электронным управлением. Этот элемент используется для приложения активной силы для противодействия помехам, исходящим от дороги. Приводы, которые обычно используются в такого рода приложениях, бывают разных типов. Главное преимущество активной системы заключается в возможности выбора стратегии управления, которая позволяет регулировать поведение системы, например, управление компромиссом между комфортом и управляемостью.

В зависимости от классификации вибраций в диссертации были представлены наиболее важные типы моделей дорог. Простейшая форма неровности дороги имеет **синусоидальную** форму. Для **реальных** дорожных, используются вибраций случайные фильтрованные помехи во временной области в соответствии со стандартом ISO-8608. Проведенные профили дорог используются как в качестве отдельных вариантов для выяснения реакции подвески так и при моделировании. Также при исследовании, сложных вариантов профилей дорог последует их объединения.

Представлены основные традиционные стратегии управления активной подвеской, включая ЛКР (LQR), ПИД, управление скользящим режимом, H_{∞} и другие. Также Представлены перспективные методы управления по данным наблюдений, которым уделяется много внимания в последние годы. Они рассматривается как альтернатива традиционным методам регулирования, таким как, например, ПИД регулятор, не требуют знания точной модели, обладают рядом ценных свойств и могут рассматриваться как «работающие» методы управления.

Таким образом, они являются хорошими кандидатами для решения проблем управления, связанных с обеспечением качественного движения автомобиля, так как в этом случае удаётся выделить существенные динамические процессы, влияющие на качество движения и пренебречь несущественными. Наиболее важной составляющей в методе управления по данным наблюдений, является блок активного управления подавлением помех (АУПП). АУПП состоит из двух основных контуров: контура обратной связи и

контура оценки. АУПП состоит из трех основных блоков: **регулятора (РЕГ)**, **наблюдателя** (Наблюдатель с расширенным состоянием (НРС)), **схемы подавления помех (СПП)** и **следящего дифференциатора (СД)**(Рис. 1).

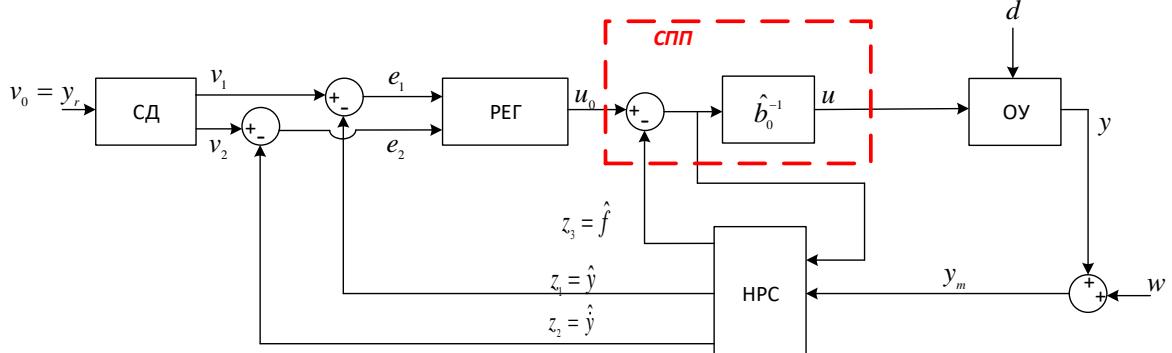


Рис. 1. Схема АУПП второго порядка

Помехи, которые в основном являются внешними, оцениваются с помощью наблюдателя, и они могут быть устранены, что делает схему управления свободной от помех. Как и ПИД-регулирование, закон управления АУПП основан на ошибке, в основе получения которой лежит наблюдатель состояния системы. Основная идея состоит в том, чтобы 1) упростить описание регулируемого объекта таким образом, чтобы собрать все возмущения, внешние и внутренние, а также все неизвестные или игнорируемые величины и выражения в один термин возмущения, 2) приступить к оценке последствий этого возмущения и 3) разработать средства для отмены его последствий, используя собранную оценку как часть управляющего действия с обратной связью. АУПП метод является основой для следующих решений, которые предлагаются для решения компромисса между степенью демпфирования и степенью управляемости.

Постановка задачи выполняется с указанием объекта исследования, ограничений, показателей качества и требований. **Объектом исследования** является активная система подвески типа «полный автомобиль» с 7 степенями свободы(Рис. 2).

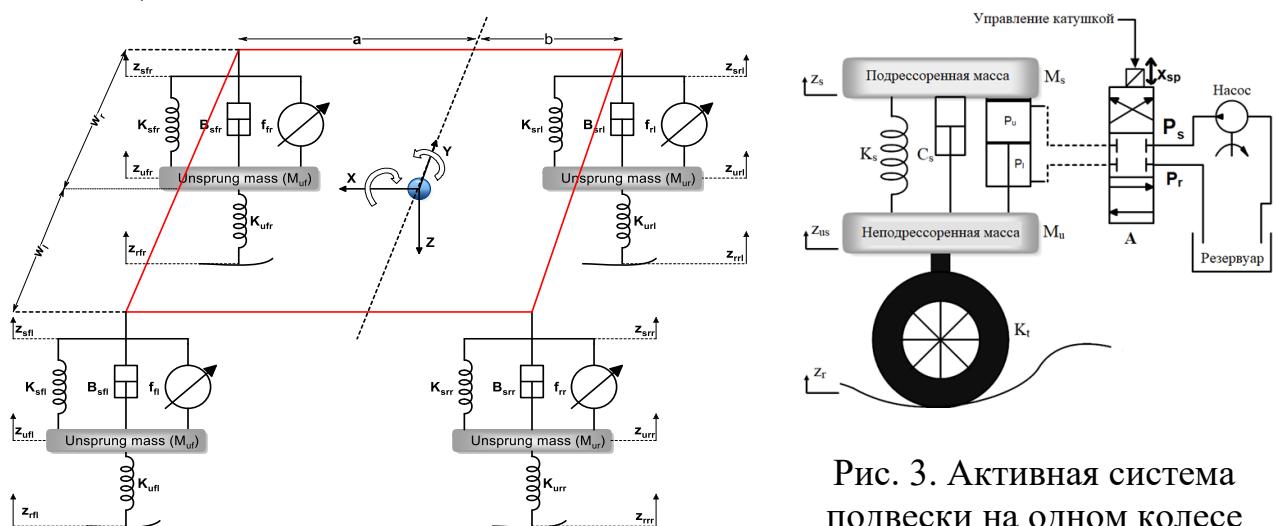


Рис. 3. Активная система подвески на одном колесе

Рис. 2. Объект исследования: «полный автомобиль»

Каждый узел подвески колес представляет собой гидравлическую быстроактивную систему (Рис. 3). Действующее усилие ($f_i[H]: f_{fl}, f_{fr}, f_{rl}, f_{rr}$) на подвеску каждого колеса выражается следующим образом. Система активной подвески использует гидравлический привод для уменьшения количества внешней мощности, необходимой для достижения качественного движения автомобиля. На Рис. 4 показана гидравлическая система активной подвески автомобиля. На схеме: $M_s[K_2], M_{us}[K_2]$ – подпрессоренная и неподпрессоренная массы; $z_{us}[m]$ – вертикальная координата центра тяжести колеса; $z_s[m]$ – вертикальная координата центра тяжести кузова; $z_r[m]$ – амплитуда профили дороги; $C_s[H.c/m]$ – коэффициент упругого сопротивления элемента подвески; $K_s[H/m]$ – коэффициент жесткости подвески; А – исполнительный элемент (гидроцилиндр); $K_t[H/m]$ – коэффициент жесткости шины.

Измерения проводятся с использованием комбинации различных датчиков. используются четыре линейных потенциометра, по одному установленному на каждой подвеске, вместе с набором из восьми трехосных МЭМС-акселерометров (MEMS), четыре из которых установлены на колесах, а остальные четыре - на раме кузова автомобиля, рядом с шарниром подвески. блок инерциальных измерителей (БИИ, IMU) с девятью степенями свободы, который состоит из трехосного акселерометра, трехосного гироскопа и трехосного магнитометра, установлен рядом с центром тяжести автомобиля. Четыре датчика, расположенные на раме, выполняют двойную задачу: измеряют вертикальные ускорения вблизи места подвешивания и помогают оценить общее положение автомобиля. Фактически, четыре трехмерных ускорения, полученные с четырех узлов, передаются в IMU для лучшей оценки тангла и крена транспортного средства (Рис. 4).

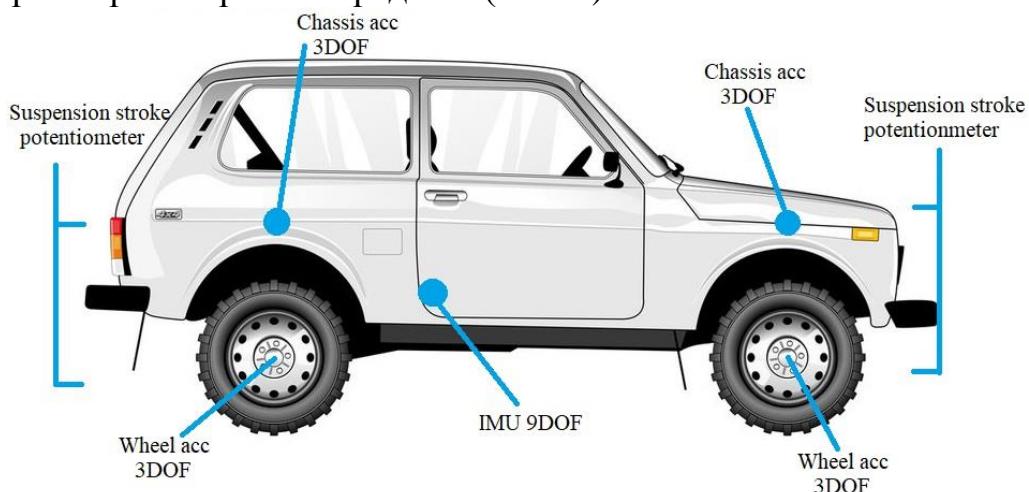


Рис. 4. Расположение датчиков на автомобиле

Представлены **ограничения** которые взяты из требований западных производителей машин. Эти ограничения заключаются в следующем. 1- Дорожные помехи, определены стандартом ISO 8608; 2- В соответствии с

(ISO2631-1, 1997), если максимальная амплитуда дорожных возмущений составляет менее 7 см, а скорость автомобиля изменяется в пределах 20-60 км/ч, тогда ускорение подпрессоренной массы должно удовлетворять следующему условию $|\ddot{z}_s| \leq 0.315 \text{ м} / \text{с}^2$, это ограничение в вопросе комфорта; 3- Если максимальная амплитуда ускорения подпрессоренной массы $\max |\ddot{z}_s| \leq 4.5 \text{ м} / \text{с}^2$ тогда отклонение подвески должно соответствовать следующему условию $|z_s - z_{us}| \leq 0.127 \text{ м}$; 4- Дополнительные ограничения связаны с динамическим усилием шины, которое увеличивается с увеличением прогиба шины. Эти ограничения устанавливаются в качестве верхнего предела максимального прогиба шины (Коэффициент динамической нагрузки (DLC) < 0.13). **Показатели качества** подвески представлены следующим образом. Степень демпфирования (следовательно, комфорт) оценивается с использованием среднеквадратичного значения (RMS) ускорения подпрессоренной массы, соответствующего ISO2631-1: $\sigma_1 = RMS(\ddot{z}_s)$; степень управляемости оценивается с использованием следующих предложенных критериев.

1- Степень управляемости на каждом отдельном колесе:

$$\sigma_{2i} = \sqrt{\int_{w=0Hz}^{w=20Hz} S_{i(z_s - z_u)} dw} \times DLC_i \quad \text{где } i \text{ - номер соответствующего колеса, } S_{i(z_s - z_u)} -$$

значение PSD соответствующего отклонения подвески, а DLC_i представляет DLC в узле номер i автомобиля. 2- Степень управляемости системы типа

$$\text{«полный автомобиль»: } \sigma_2 = \sqrt{\int_{w=0Hz}^{w=20Hz} S_\varphi dw} \times \frac{\sum_{i=1}^4 DLC_i}{4} \quad \text{где } S_\varphi \text{ представляет PSD}$$

угла крена. DLC математически представлен в виде $DLC = RMS\left(\frac{K_t(z_{us} - z_r)}{(M_s + M_u)g}\right)$,

и g - ускорение силы тяжести. Чтобы нормализовать представление результатов, введены другие математические переменные: $\Delta_1 = 1.3 / \sigma_1$, $\Delta_2 = 10^4 \times 4 / \sigma_2$. В результате получается следующая Таблицу .1 для оценки качества системы подвески.

Таблица. 1. Таблица оценки качества подвесной системы.

Δ_1	Степень Демпфирования	Δ_2	Степень управляемости
<1.3	Плохой	<0.68	Плохой
[1.3-2]	Низкий	[0.68-1.2]	Низкий
[2-4]	Хороший	[1.2-4]	Хороший
>4	Отлично	>4	Отлично

Таким образом, параметры закона управления непосредственно влияют на степень управляемости и степень демпфирования. Отсюда и возникает задача нахождения компромисса.

Вторая глава посвящена управлению компромиссом между степенью управляемостью и степенью демпфирования в модели типа «полный

автомобиль» (МПА) с использованием подхода «снизу-вверх». Один из подходов опирается на построение четырех независимых регуляторов для четырех систем подвески типа «четверть автомобиля» (МЧА) с последующим их объединением на основе модели **Samochodu**. Для управления компромиссом между степенью демпфирования и степенью управляемости в МЧА предлагается модификация обычной схемы АУПП. Обычный АУПП имеет дело с системами с одним входом и одним выходом. Таким образом, обычный АУПП может регулировать только один показатель качества (комфорт или управляемость). Итак, в предлагаемом подходе вносится модификация для введения двух показателей качества в одну схему. В рассмотренном подходе используется отклонение подвески и смещение подпрессоренной массы в качестве отдельных обратных связей с АУПП с несколькими входами и несколькими выходами. Этот подход требует отдельной оценки смещения кузова (z_s) и отклонения подвески ($z_s - z_{us}$), поэтому используется фильтр Калмана. Система регулирования строится в два этапа. **На первом этапе**, АУПП с несколькими входами и несколькими выходами предназначена для перекрестной связки рассматриваемых выходов в зависимости от алгоритмической процедуры. **На втором этапе**, желаемые сигналы отклонения подвески и смещения подпрессоренной массы изменяются оптимально, чтобы предотвратить превышение максимальных пределов отклонения подвески. На Рис. 5 показана схема предлагаемого подхода. Поскольку необходимо использовать выходы z_s и $z_s - z_{us}$ независимо, используется фильтр Калмана с тремя датчиками (два акселерометра и потенциометр). Линейный фильтр Калмана построен здесь на основе дифференциальных уравнений (2) и уравнения (3). Эти уравнения (2,3) показывают представление в пространстве состояний двух интеграторов второго порядка, которые используются для получения значений положения z_s и z_{us} из измеренных ускорений \ddot{z}_s и \ddot{z}_{us} . Измерение прогиба подвески $z_s - z_{us}$ используется для корректировки расчетных положений в каждый момент времени и для этой цели добавляется в вектор измерения (y_m).

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= a_1 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= a_2 \end{aligned} \quad y_e = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_1 - x_3 \end{pmatrix} \quad y_m = \begin{pmatrix} \int \int a_1 \\ \int \int a_2 \\ d_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Где $a_1 [m/c^2]$ - измеряемое ускорение подпрессоренной массы, $a_2 [m/c^2]$ - измеряемое ускорение неподпрессоренной массы, $d_1 [m]$ - измеряемый прогиб подвески, y_e — вектор оценки, а y_m — вектор измерения и $(x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)^T = (z_s \ \dot{z}_s \ z_{us} \ \dot{z}_{us})^T$.

На первом этапе, Предлагаем выбора коэффициентов закона регулирования и параметров наблюдющего устройства АУПП. Эта известная процедура которая включена в программное обеспечения МАТЛАБ. Используя

этот подход, сохраняется хороший комфорт и хорошая степень управляемости до 70 км / ч, когда амплитуда дорожных возмущений составляет менее 7 см. На Рис. 6 и Рис. 7 показано степень комфорта и степень управляемости при изменении скорости автомобиля до 70 км/ч.

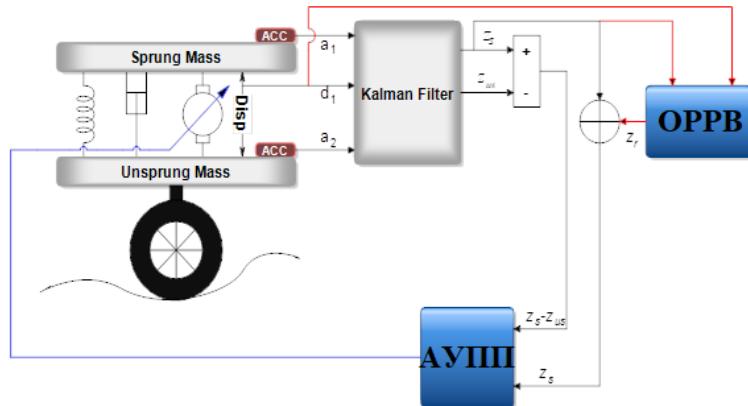


Рис. 5. Схема предлагаемого подхода

На втором этапе, добавляется блок усиления ограничения, чтобы предотвратить превышение установленных пределов отклонения подвески (12.7 см).

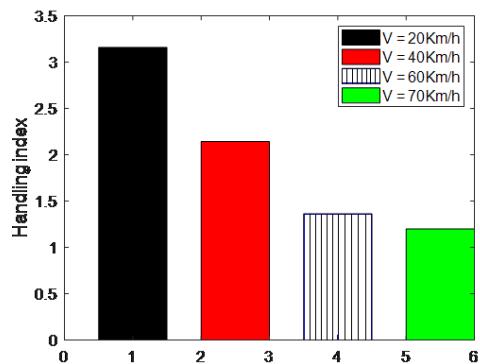


Рис. 6. Гистограмма степени управляемости

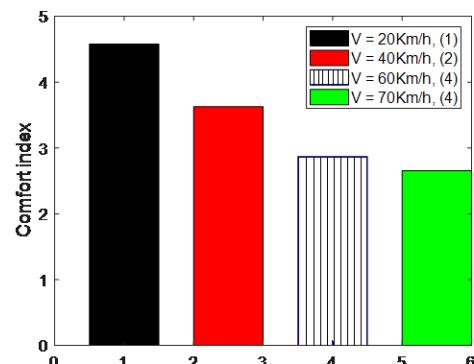


Рис. 7. Гистограмма степени демпфирования

АУПП во внутреннем контуре управления обеспечивает систему второго порядка, которая управляется регулятором ПД, таким образом можно примерно переписать уравнение подпрессоренной массы следующим образом:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= B_s X - 2w_z M_s u; \quad X = z_s - z_{us} \\
 \dot{x}_1 &= -\frac{K_s}{B_s} x_1 - \frac{2w_z K_s M_s}{B_s} u + w_z^2 M_s u = Ax_1 + Bu; \\
 A &= -\frac{K_s}{B_s}; \quad B = -\frac{2w_z K_s M_s}{B_s} + w_z^2 M_s
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $B_s [H.c / m]$ - коэффициент демпфирования подвески, $K_s [H / m]$ - коэффициент жесткости, $M_s [Kg]$ - подпрессоренная масса, $X [m]$ - прогиб подвески, $-w_z [\text{рад} / \text{с}]$ - полюс замкнутого контура внутренней системы, который регулируется АУПП. Это задача оптимизации вертикального

положения подрессоренной массы в режиме реального времени, которая может быть решена автоматически с помощью алгоритма QuadProg. Решение этой задачи оптимизации помогает получить оптимальный опорный сигнал смещения шасси $z_r [m]$ (Рис. 5). На Рис. 8 показан прогиб подвески с ограничительным блоком и без него.

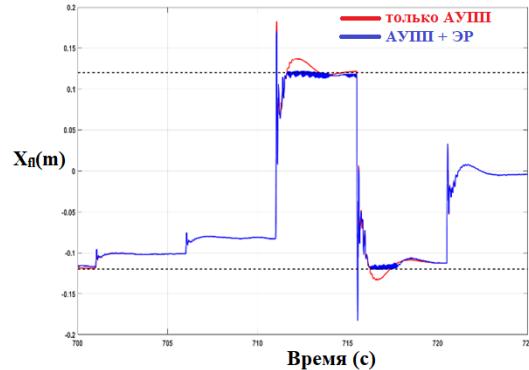


Рис. 8. Прогиб подвески с ограничительным блоком и без него

Для тестирования объединенных четырех узлов на основе модели Samochodu используются две разные дороги класса D по стандарту ISO 8608 для левой и правой сторон автомобиля соответственно. Для представления скорости автомобиля отображается время задержки между дорожными возмущениями передних и задних колес.

На Рис. 9 и Рис. 10 показано, как степень демпфирования и степень управляемости меняются со скоростью автомобиля. Видно, что вся система управления сохраняет хорошую степень демпфирования и хорошую степень управляемости всего до 40 км/ч, хотя независимые системы типа «четверть автомобиля» сохраняют хорошую степень демпфирования и хорошую степень управляемости до 70 км/ч.

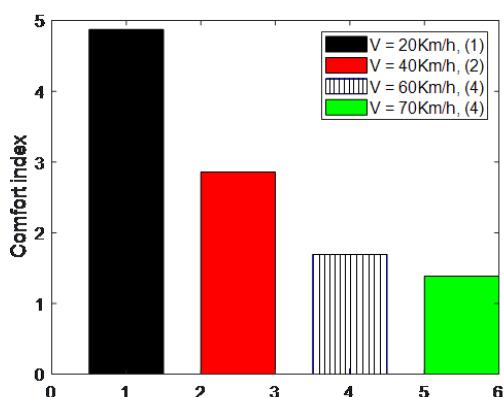


Рис. 9. Степень демпфирования меняется в зависимости от скорости автомобиля

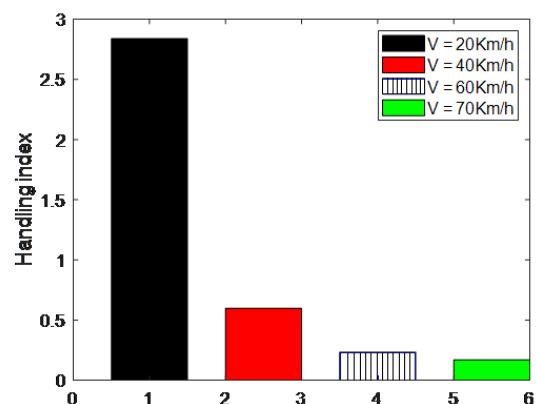


Рис. 10. Степень управляемости меняется в зависимости от скорости автомобиля

Результаты исследования полученные на основе моделирования позволяют констатировать что подход снизу-вверх не рекомендуется для управления автомобилем с точки зрения нахождения компромиссного решения.

Третья глава посвящена управлению компромиссом между степенью управляемости и комфортом в модели типа «полный автомобиль» (**МПА**) с использованием подхода **«сверху-вниз»**.

Система управления разделена на внутренний контур и внешний контур. Во внутреннем контуре регулируются показатели качества (следовательно, степень управляемости и комфорт) с помощью АУПП. Во внешнем контуре используется эталонный регулятор (ЭР) для предотвращения превышения допустимых пределов отклонения подвески.

Процессы движения на экипаж и полезный груз действует ускорение. В качестве оценки эти действующие ускорение, согласно международным стандартам ISO, используется СКО вертикального ускорения \ddot{z}_s . Для целей обеспечения комфорта, величина этого ускорения должен быть незначительной. Поэтому, можно предполагать что ему будет соответствует незначительное вертикальное перемещение z_s . По этим причинам, в дальнейшем при оценке комфортности будет использоваться переменный вертикального перемещения совместно с учетом углового движения по каналу крена. Таким образом, вопрос о компромиссе между степенью управляемости и степенью демпфирования (комфорта) может быть истолкован как компромисс между смещением z_s и углом крена φ . Угол наклона θ не оказывает существенного влияния.

Функция качества, которая должна быть оптимизирована для системы подвески, определяется следующим образом

$$J = \int_0^{T_p} [(1 - \rho)(\varphi(t + \tau))^2 + \rho(z_s(t + \tau))^2] d\tau, \quad (3)$$

где $T_p [c]$ - период, в течение которого ищется компромисс, $z_s(t + \tau)$ - будущее вертикальное смещение кузова автомобиля во времени $\tau [c]$, $\varphi(t + \tau)$ - будущий угол крена, а $\rho \in [0,1]$ - это параметр компромисса. После серии математических операций получаем закон управления, применяемый к вертикальному перемещению и крену, соответственно, который определяется следующим уравнением:

$$u_i = -\frac{1}{\hat{b}_{0i}}(K_{pi}(y_i - y_{ri}) + K_{di}\hat{y}_i + \hat{f}_i), \quad i = \{z, \varphi\}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} K_{pz} &= K_{p\varphi} = \frac{10}{3T_p^2} \\ K_{dz} &= K_{d\varphi} = \frac{5}{2T_p} \end{aligned} \quad (5)$$

Полюс замкнутого контура и коэффициент демпфирования системы, управляемой АУПП, могут быть рассчитаны следующим образом:

$$K_p = w_{CL}^2, \quad K_d = 2\xi w_{CL} \Rightarrow$$

$$-w_{CL} = -\sqrt{K_p}, \quad \xi = 0.5 \frac{K_d}{\sqrt{K_p}}. \quad (6)$$

Следовательно, характеристическое уравнение всей системы будет $\Delta(s) = s^2 + K_d s + K_p$ и регулятор всегда будет устойчивым по Гурвицу, если $K_p, K_d > 0$. Это всегда верно, если $T_p > 0$. На Рис. 11 показана схема системы с замкнутым контуром. Исследование компромисса между степенью демпфирования и степенью управляемости проводится в два этапа: на первом этапе наблюдается, как изменяется степень демпферования и степени управляемости при изменении коэффициента компромисса ρ , когда скорость автомобиля фиксируется на 54 км/ч, поскольку его можно рассматривать как среднюю скорость. В конце этого этапа, получается балансовое значение ρ , которое может дать хороший компромисс между комфортом и степенью управляемости. На втором этапе наблюдается, как степень демпферования и степень управляемости изменяются при изменении скорости автомобиля, когда ρ фиксируется на балансовом значении. На Рис. 12 представлены результаты первого этапа, где время горизонта зафиксировано равным $T_p = 0.2c$, а значения показателей степени демпфирования и степени управляемости нормированы в диапазоне [0,1]. Можно видеть, что $\rho = 0.4$ - хороший компромисс.

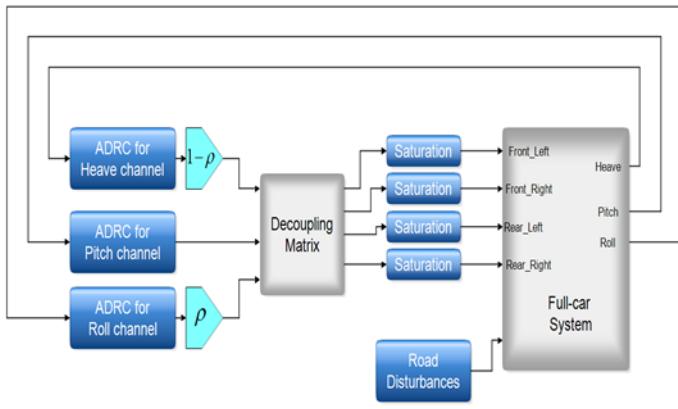


Рис. 11. Схема модели типа МПА с системой подвески, управляемой оптимизированным-АУПП

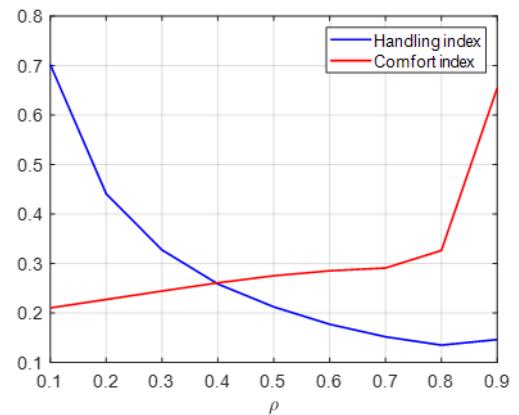


Рис. 12. Нормализованные значения степени демпферования и степени управляемости в диапазоне [0,1]

На втором этапе, выбрав $\rho = 0.4$, можно изучить изменение степени демпферования и степени управляемости с изменением скорости автомобиля. В Таблице. 2 показано изменение значений показатели комфорта и степени управляемости при изменении скорости автомобиля. Из Таблицы .2 видно, что предложенный алгоритм отлично работает до скорости автомобиля 80 км/ч. С другой стороны, поездка на этом автомобиле в таких условиях будет опасна для пассивной системы на скорости более 30 км/ч.

Таблица. 2. Степень демпферования и степень управляемости при изменении скорости автомобиля.

Скорость автомобиля	степень демпферования		степень управляемости	
	Активный	Пассивный	Активный	Пассивный
20	0.1248	0.4169	0.68 x 10 ⁻⁴	4.82 x 10 ⁻⁴
30	0.1529	0.5106	1.02 x 10 ⁻⁴	7.23 x 10 ⁻⁴
40	0.1765	0.5896	1.36 x 10 ⁻⁴	9.65 x 10 ⁻⁴
50	0.1974	0.6592	1.70 x 10 ⁻⁴	12.0 x 10 ⁻⁴
60	0.2162	0.7221	2.04x 10 ⁻⁴	14.0x 10 ⁻⁴
70	0.2341	0.7800	2.42x 10 ⁻⁴	17.0x 10 ⁻⁴
80	0.2511	0.8338	2.89x 10 ⁻⁴	19.0x 10 ⁻⁴
90	0.2669	0.8844	3.45x 10 ⁻⁴	22.0x 10 ⁻⁴
100	0.2868	0.9323	4.26x 10 ⁻⁴	24.0x 10 ⁻⁴

На следующем шаге, фиксируется переменную $\rho = 0.4$ и строится блок оптимизации внешнего контура (эталонный регулятор).

Задача эталонного регулятора состоит в том, чтобы определить опорные углы (тангажа и крена $\theta[\text{рад}], \varphi[\text{рад}]$) и положение (z_s), которые предотвращают отклонения подвески ($X_i, i = \{fl, fr, rl, rr\}$) от превышения установленных пределов. Для текущего положения (z, θ, φ), используя прогностическую модель, рассчитывается минимально оптимальное положение ($u_1 = z_r$, $u_2 = \theta_r$ и $u_3 = \varphi_r$), при котором установленные ограничения не будут превыщены. Вводится разность между рассчитанным положением и текущим в качестве желаемого сигнала для внутреннего контура. Модель прогнозирования будет использоваться для прогнозирования следующего состояния отклонений подвески, а затем использовать этот прогноз для корректировки текущего эталона всей управляемой системы. Текущее состояние может быть измерено, а также известны текущие управляющие сигналы, поскольку они являются текущей положеней, следовательно, можно прогнозировать следующие состояния. Следующие состояния должны быть ограничены, чтобы быть меньше или равными некоторой константе (установленные пределы отклонения подвески). Если ограничения не будут выполнены, то эталонный регулятор изменит желаемое положение как можно меньше, чтобы соответствовать ограничениям. Все это можно записать математически как минимизацию абсолютного квадрата ($|u - u_k|^2$), где u_k - модифицированное управляющее действие (в данном случае: желаемые значения z_s, θ, φ) с учетом наложенных ограничений, т.е.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } |u - u_k|^2, \\ & \text{subject to } A_d x_k + B_d u_k \leq x_{max} \end{aligned} \tag{7}$$

где $u = (u_1 \ u_2 \ u_3)^T$ и (A_d, B_d) дискретные системные матрицы. К ограничениям должна быть добавлена функция управляющего воздействия. Таким образом, задача оптимизации (8) будет.

$$\begin{aligned}
& \text{minimize } |u - u_k|^2, \\
& \text{subject to : } A_d x_k + B_d u_k \leq x_{max}; \\
& u_{min} \leq u \leq u_{max}
\end{aligned} \tag{8}$$

Это задача квадратичного программирования, которую можно решить с помощью решателя квадратичного программирования QuadProg.

На Рис. 13 показано сравнение ускорения между активной системой, управляемой ЭР, и пассивной системой. И на Рис. 14 показано сравнение между системой управления АУПП без эталонного регулятора и системой управления АУПП с эталонным регулятором (АУПП-ЭР).

Как видно из рисунков, регулятор корректирует опорные сигналы, чтобы система не выходила за установленные пределы.

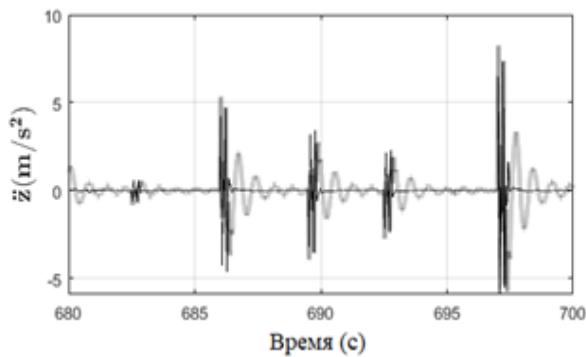


Рис. 13. Ускорение шасси для пассивных и управляемых АУПП систем

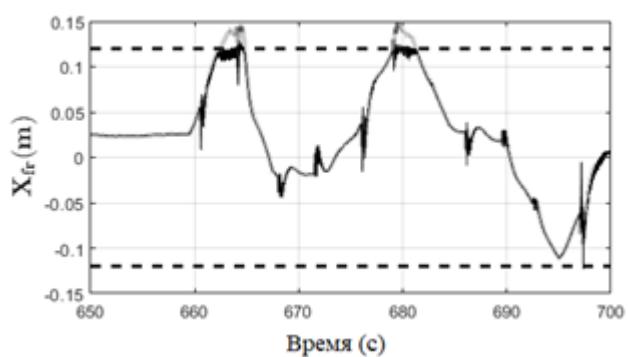


Рис. 14. Прогиб подвески переднего левого колеса

В четвертой главе проведена обработка и алгоритмы (МРС и «эталонный регулятор») для сравнения различных методов управления подвеской в составе спроектированного и внедренного стенда полунатурного моделирования для системы типа «полный автомобиль» с помощью микроконтроллера Giga Device (GD32F405RET6). Результаты показали, что предложенный алгоритм улучшил характеристики не менее чем на ~50%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1- Введён критерий качества для оценки степени управляемости в модели

типа «полный автомобиль» ($\sigma_2 = \sqrt{\int_{w=0Hz}^{w=20Hz} S_\phi dw} \times \frac{\sum_{i=1}^4 DLC_i}{4}$), с использованием

PSD угла крена и среднего DLC четырех шин.

2- Создан и реализован алгоритм оптимизации в режиме реального времени для управления компромиссом между степенью управляемости и степенью демпферования с использованием методов управления по данным наблюдений.

3- Устранена необходимость использования автомобильных лидарных сканеров (LiDAR, ЛИДАР) для контроля компромисса между степенью демпфирования и степенью управляемости.

4- Проведено модельное сравнение метода МРС с использованием ЛИДАРа и предлагаемая метода без ЛИДАРа которая показала значительно уменьшение времени реализации (50%) при получение тех же результатов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Alhelou M., Gavrilov A. I. Synthesis of Active Disturbance Rejection Control// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2020. № 4. Р 22-41. (1,75 п.л./0,9 п.л.).
2. Алхелу М., Гаврилов А. И. Сравнительный анализ алгоритмов линейного и линейного-квадратичного управления с активным подавлением помех// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2021. № 4. С 4-26. (1 п.л./0,5 п.л.).
3. Адаптивное управление компромиссом между управляемостью и комфортом в модели типа «четверть автомобиля», Алхелу М[и др.]//Проблемы управления. 2022. № 2. С 36-48. (1,4 п.л./0,7 п.л.).
4. Muhammed A., Gavrilov A. I. Managing the handling-comfort contradiction of a quarter-car system using Kalman filter// Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2021. Vol 43. No 10. P 2292-2306. (1,6 п.л./0,8 п.л.).
5. Muhammed, A., Gavrilov A. I. Unscented Kalman-filter to manage the handling-comfort trade-off of quarter-of-vehicle// Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2021. Vol 44. No 1. P 232-244. (1,4 п.л./0,7 п.л.).
6. Muhammed A., Dayoub Y., Gavrilov A. I. Reference governed ADRC approach to manage the handling-comfort contradiction in a full-vehicle suspension// Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2022. Vol 24. P 01423312221089715. (0,9 п.л./0,4 п.л.).
7. Muhammed A., Wassouf Y., Gavrilov A. I. Linear-control vs ADRC for automatic management of the handling-comfort contradiction of a quarter-car system, International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2022. Vol. 29, No. 2. P 145-162. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
8. Muhammed A., Salloum Kh., CNF-ADRC for MacPherson strut quartercar suspension model//Interdisciplinary Journal of Applied and Basics Subjects. - 2021. Vol 1. No 2. P 157-181. (1,1 п.л./0,6 п.л.).
9. Управление компромиссом между управляемостью и комфортом системы подвески типа «четверть автомобиля» с использованием активного управления подавлением помех и уравнения Вышнеградского, Алхелу М[и др.] // Мехатроника автоматизация, управление. 2022. № 7. С 367-375. (0,25 п.л./0,12 п.л.).
10. Алхелу М., Саллум Х., Гаврилов А. И. Оптимизированный подход adrc для управления компромиссом между управляемостью и устойчивостью на дороге системы четверти автомобиля// в XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика СП Королёва и других выдающихся отечественных учёных-пионеров освоения космического пространства. 2021. С 429-430. (0,75 п.л./0,4 п.л.).