

На правах рукописи

УДК 629.33

**Альсаламех Бальсам**

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ  
АВТОМОБИЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ  
СТАБИЛИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ ДОРОГИ**

Специальность: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре колесных машин 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:

**Рязанцев Виктор Иванович**

доктор технических наук, доцент  
кафедра «Колесные машины»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор

Официальные оппоненты:

**Галевский Евгений Александрович**

Доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования. Московский технологический  
университет (МГУПИ). Кафедра «Транспортные  
средства и информационно-управляющие  
системы», профессор

**Козлов Юрий Николаевич**

кандидат технических наук  
Центр испытаний ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
управляемости

Ведущая организация:

**Ведущая организация**

Волгоградский государственный технический  
университет. Россия, 400005, Волгоград, пр. им.  
Ленина, 28. Тел.: (8442) 23-00-76

Защита состоится «02» июля 2018 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,  
д.т.н.



Е.Б. Сарач

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы.**

Известно, что кроме автомобильных магистралей высокого качества встречаются многочисленные дороги с участками, характеризующимися явно выраженным случайным и периодическим профилем неровностей. Совершенство конструкций современных автомобилей позволяет двигаться по ним с достаточно высокой скоростью. В таких случаях возможно возникновение явления резонанса вертикальных колебаний колес относительно корпуса. В современных автомобилях собственная частота колебаний колес в системах поддрессоривания находится в диапазоне 7-15 Гц. В условиях движения автомобиля по периодическому профилю при резонансе недрессоренных масс это приводит к значительным колебаниям вертикальных реакций дороги на колесах автомобиля. Возникают, с одной стороны, перегрузки элементов подвески автомобиля, с другой – ослабление вертикальных реакций дороги вплоть до полной потери связи колеса с дорогой. Ослабление вертикальной реакции дороги на колесе ведет к снижению устойчивости движения автомобиля в связи с уменьшением сопротивления боковому уводу колес автомобиля. Отсюда вытекает необходимость решения задачи регулирования вертикальных реакций дороги на колесах автомобиля в процессе движения по неровностям с целью снижения возможности значительного ослабления вертикальных реакций.

### **Цель работы.**

Повышение безопасности движения автомобиля путем стабилизации вертикальных реакций дороги на колесах автомобиля.

### **Задачи работы.**

1. Разработать структуру системы стабилизации вертикальных реакций дороги при движении автомобиля по дороге с неровностями в частотном диапазоне возмущений 7-15 Гц.
2. Разработать математическую модель движения автомобиля с системой стабилизации вертикальных реакций дороги при движении автомобиля.
3. Произвести оценку эффективности стабилизации вертикальных реакций дороги, направленной на повышение устойчивости движения автомобиля.
4. Разработать алгоритм управления стабилизацией вертикальных реакций дороги с использованием аппарата «нечеткой» логики.

### **Научная новизна**

1. Предложен новый метод повышения безопасности автомобиля, отличающийся тем, что путем стабилизации вертикальных реакций дороги достигается повышение устойчивости движения автомобиля по неровностям.
2. Предложен новый критерий эффективности работы системы стабилизации вертикальных реакций дороги – степень стабилизации вертикальных реак-

ций, позволяющий оценить степень снижения среднеквадратического отклонения вертикальной реакции.

3. Разработан адаптивный алгоритм работы системы стабилизации вертикальных реакций дороги, обеспечивающий снижение среднеквадратического отклонения колебаний вертикальных реакций путем управления перемещений актюаторами, входящими в систему поддрессирования автомобиля.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и результатов доказана сравнением теоретических и экспериментальных результатов исследования динамики системы поддрессирования и базируется на использовании апробированных методов имитационного математического моделирования.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке программного обеспечения для проведения имитационного моделирования движения автомобиля, оборудованного системой стабилизации вертикальных реакций дороги и методов управления стабилизацией вертикальных реакций дороги на колесах автомобиля (СВРДК). Сформулированы требования к аппаратной части испытательного стенда.

#### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались:

1. на научно-технических семинарах кафедры-СМ10- «Колёсные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2015-2018 гг.);
2. на девятой Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2016 г.);
3. на десятой Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017 г.);

#### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано 5 научных статей, из них 3 в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, общим объёмом 5 п.л.

#### **Структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 152 листах машинного текста, содержит 98 рисунков, 10 таблиц. Список литературы содержит 92 наименования.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, заключающейся в разработке метода повышения устойчивости движения автомобиля путём стабилизации вертикальных реакций дороги на колесах. Приведено

краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель работы и отражены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор систем, повышающих устойчивость и управляемость автомобиля. Дан анализ устойчивости движения и управляемости автомобиля, математических моделей взаимодействия колеса с опорной поверхностью и движения автомобиля, применяемых при моделировании движения колёсной машины. Указанные вопросы разрабатывали такие авторы, как Антонов Д.А., Певзнер Я.М., Гинсбург Л.Л., Смирнов Г.А., Горелов В.А., Рязанцев В.И., Пасейка Х., Балабин И.В., Купреянов А.А., Попов С.Д., Задворнов В.Н., Литвинов А.С., Чудаков Е.А., Иларионов В.А., Бухин Б.Л., Гуревич Л.В., Морозов Б.И., Фрумкин А.К., Петров И.П., Фромм Х., Жульен М., Сакаи Х.Б., Шалламах А., Фиала Е., Шустер Р., и другие.

Исследование динамики колебаний колесных машин наиболее полно отражено в работах Ротенберга Р.В., Павлова И.С., Жеглова Л.Ф., Жилейкина М.М., Певзнера Я.М., Литвинова А.С., Фаробина Я.Е., Котиева Г.О., Дика А.Б., Попова С.Д., Ларина В.В., и других, а также в трудах научных школ: МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, МАДИ, МАМИ, ФГУП ГНЦ «НАМИ», Академии БТВ, 21 НИИИ МО РФ и других.

В работах таких ученых, как Слепенко Е.А., Желтышев А.В., Першин С.А., Федотов А.И., Доморозов А.Н. и Нгуен Ван Ньянь рассматривается анализ влияния движения автомобиля по периодическому профилю дороги на параметры движения автомобиля: значение вертикальных реакций, сопротивление качению колеса, расход топлива автомобиля и др.

Благодаря применению «интеллектуальной шины» (Intelligent Tire System) могут быть достигнуты усовершенствования в плане оптимизации работы антиблокировочной системы (АБС), противобуксовочной системы (ПБС), управления устойчивостью движения автомобиля, оценки коэффициента трения. В лабораториях многочисленных исследовательских центров мира создаются экспериментальные образцы «интеллектуальных» шин с использованием всех возможных средств измерения параметров работы шины.

Исследованиями в области «интеллектуальных» шин достигнуты результаты, которые отражены в работах ученых: Иванова В.Г., Ryosuke Matsuzaki., Yilmazoglu O., Brandt M., Sigmund J., Borrelli F., Hedrick., и других.

В работе Иванова В.Г. представлены некоторые способы измерения коэффициента сцепления колеса с дорогой (Рис. 1).

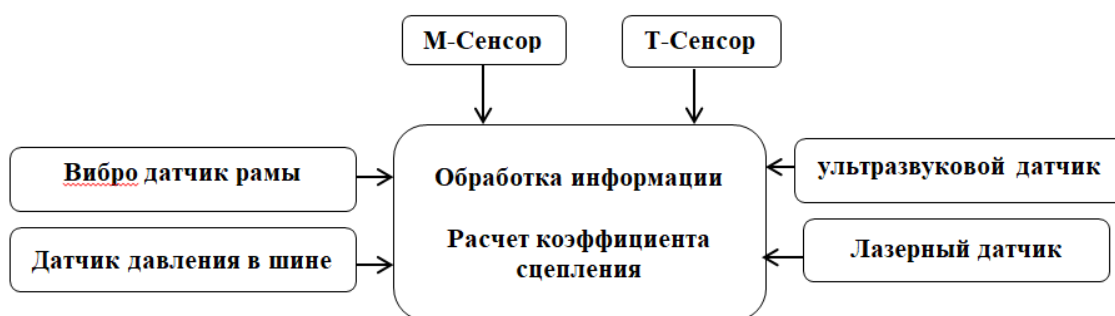


Рис. 1. Комплексная сенсорная система для оценки коэффициента сцепления

В работах Gurkan Erdogan, Sanghyun Hong, Francesco Borrelli, Karl Hedrick предлагаются методы оценки коэффициента трения на дорогах с использованием нового беспроводного акселерометра.

Выполнен анализ систем активных подвесок автомобиля. Рассмотрены существующие решения по повышению плавности хода и устойчивости движения автомобиля (Рис. 2).

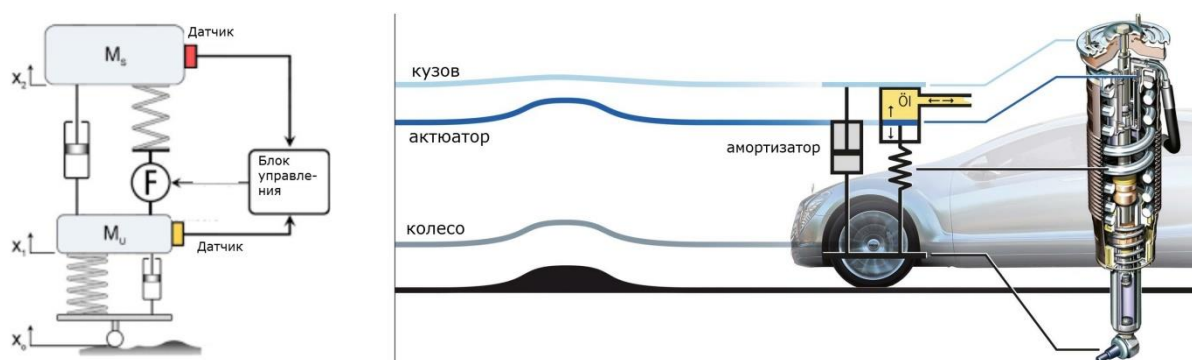


Рис. 2. Система активной подвески в Мерседесе «S-class»

Сформулированы задачи работы, решению которых посвящены остальные главы диссертации.

**В второй главе** представлен принцип работы системы стабилизации вертикальной реакции дороги на колесе автомобиля (СВРДК). Приведено математическое описание системы подвески автомобиля с/без системы СВРДК.

На Рис. 3. схематически представлена структура системы стабилизации вертикальной реакции на одном колесе. Система СВРДК включает подрессоренную массу, имитирующую кузов автомобиля, неподдрессоренную массу, имитирующую массу автомобильного колеса. В структуре подвески вместе с упругим элементом и амортизатором параллельно включен гидроцилиндр –актюатор.

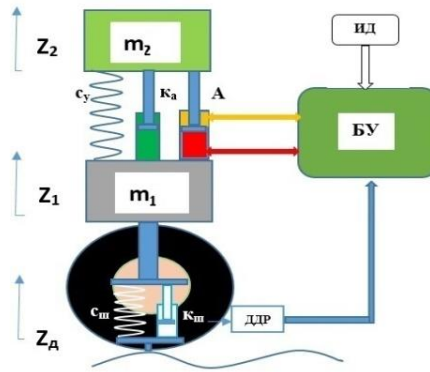


Рис. 3. Схема управления вертикальной реакцией дороги на колесе автомобиля при движении по периодическому профилю. На схеме:  $m_1$ ,  $m_2$  – неподдрессоренная и поддрессоренная массы;  $c_y$  – коэффициент упругого сопротивления (жесткость) упругого элемента подвески;  $k_a$  – коэффициент сопротивления амортизатора;  $A$  – актюатор (например, гидроцилиндр);  $c_{ш}$  – радиальная жесткость шины;  $k_{ш}$  – коэффициент неупругого сопротивления шины; БУ – блок управления; ДДР – датчик динамического радиуса; ИД – источник давления;  $Z_1$  – вертикальная координата центра тяжести колеса;  $Z_2$  – вертикальная координата центра тяжести кузова;  $Z_d$  – амплитуда профили дороги. Представленная модель системы управления с пропорциональным регулированием описывается уравнениями

$$m_2 z_2'' = c_y (z_1 - z_2 + A_{\text{п}}) + k_a (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + cc(z_1 - z_d - r_{\text{ст}}) - m_2 g$$

$$m_1 z_1'' = -c_y (z_1 - z_2 + A_{\text{п}}) - k_a (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - cc(z_1 - z_d - r_{\text{ст}}) - m_1 g + c_{\text{ш}}(z_d - z_1 + A_{\text{ш}}) + k_{\text{ш}}(\dot{z}_d - \dot{z}_1).$$

Здесь  $cc$  – коэффициент пропорциональности в пропорциональном регуляторе,  $A_{\text{п}}$  – свободная длина упругого элемента подвески,  $A_{\text{ш}}$  – свободный радиус колеса,  $r_{\text{ст}}$  – статический радиус колеса. Сила, создаваемая в актюаторе, представляется как линейная функция вариации разницы динамического и статического радиусов колеса ( $z_1 - z_d - r_{\text{ст}}$ ).

Влияние использования системы СВРДК на колебания центра масс колеса при динамических возбуждениях от дороги можно видеть на Рис. 4.

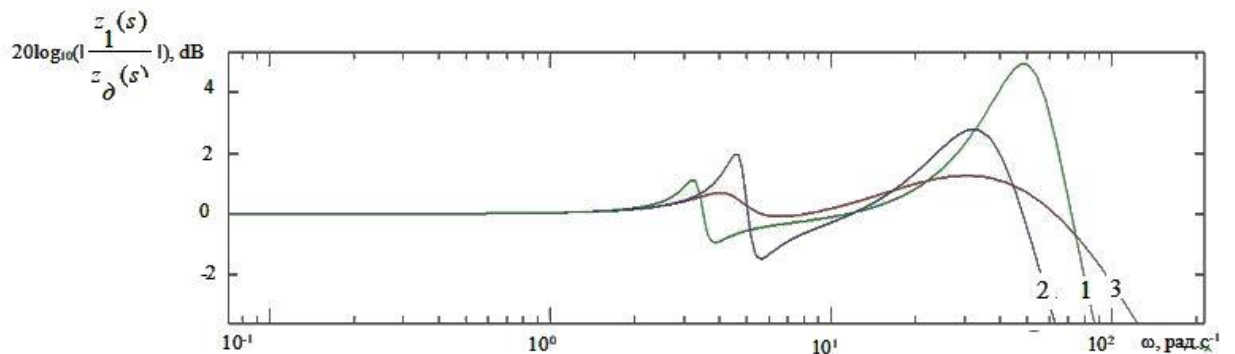


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика перемещения неподдрессоренной массы при разных регуляторах: 1 – подвеска без управления СВРДК; 2 – подвеска с управлением СВРДК с пропорциональным регулятором; 3 – подвеска с управлением СВРДК с пропорционально-дифференциальным регулятором

На Рис.4 хорошо просматривается эффективность системы стабилизации вертикальных реакций дороги на колесах. Система снижает амплитуды колебаний функции  $20\log(\|\frac{z_1(s)}{z_0(s)}\|)$  на 43% с использованием пропорционального регулятора и на 67% с использованием пропорционально- дифференциального регулятора. Снижается и амплитуда колебаний вертикальной реакции дороги на колесе. Амплитудно-частотная характеристика вертикальной реакции дороги на колесе, которая образуется в результате работы системы стабилизации вертикальной реакции при движении автомобиля по периодическому профилю, представлена на Рис. 5.

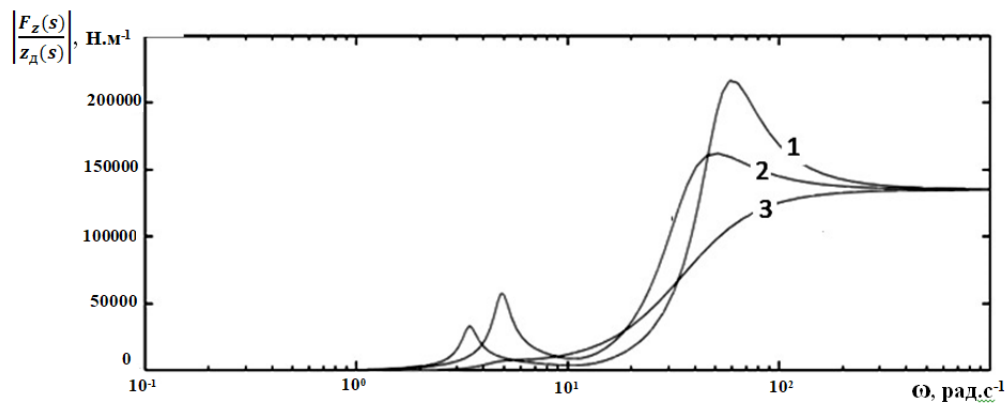


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика вертикальной реакции дороги на колесе, которая образуется в результате работы системы стабилизации вертикальной реакции при движении автомобиля по периодическому профилю. 1–система стабилизации вертикальной реакции не работает; 2– работает система СВРДК с П–регулятором; 3 – работает система СВРДК с ПД–регулятором

Подтверждение рассмотренных колебательных свойств активной подвески с системой СВРДК можно видеть на Рис .6. Эти результаты получены при моделировании в пакете Matlab-simulink. Представлена диаграмма колебаний вертикальной силы  $F_z$  подвески одного колеса без управления и с управлением по двум алгоритмам(Рис .6): с П–регулятором и с ПД–регулятором. Амплитуда этих колебаний уменьшается на 40% при использовании упомянутого выше пропорционального и на 70% при использовании пропорционально-дифференциального регуляторов.



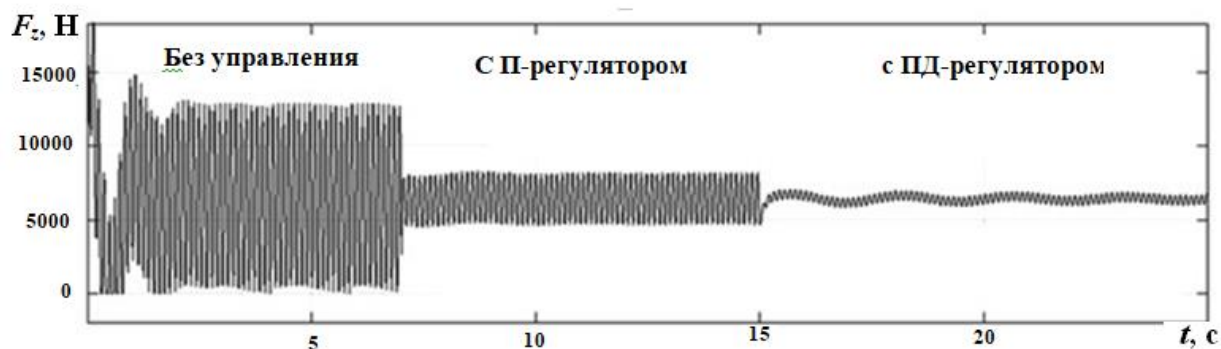


Рис. 6. Диаграмма колебаний вертикальной силы  $F_z$ , полученная в результате моделирования в пакете Matlab-simulink подвески модели одного колеса без управления и с управлением по двум алгоритмам: с П-регулятором и с ПД-регулятором

Для оценки эффективности работы системы СВРДК введем термин - степень стабилизации вертикальной реакции дороги на колесе. Обозначим этот новый параметр  $K_{ct}$ , Математически этот параметр определяется выражением

$$K_{ct} = \left(1 - \frac{d}{R_{z,c}}\right) 100 \% \quad \text{если } d < R_{z,c}$$

$$K_{ct} = 0 \% \quad \text{если } d \geq R_{z,c}$$

$$d = \frac{A-B}{2}, H \quad \text{—амплитуда колебаний вертикальной реакции;}$$

$$R_{z,c}, H \quad \text{—статическое значение вертикальной реакции;}$$

$A$  и  $B$  – максимальное и минимальное значения вертикальной реакции.

Степень стабилизации вертикальных реакций является результатом работы системы СВРДК. На диаграмме (Рис.7) представлена зависимость степени стабилизации вертикальной реакции дороги на одном колесе автомобиля в функции мощности управления в системе СВРДК.

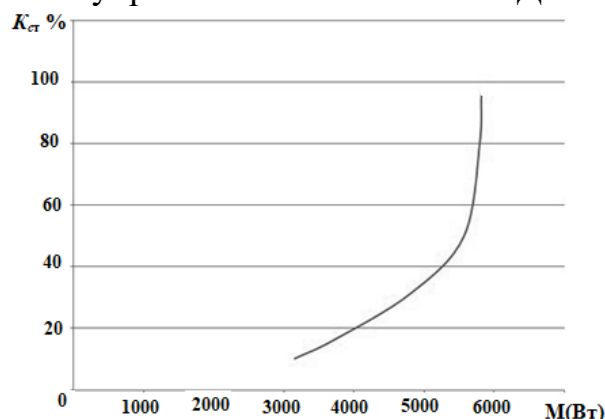


Рис. 7. Вариация степени стабилизации вертикальной реакции дороги на одном колесе автомобиля в функции мощности управления

В главе также представлен анализ эффективности работы системы СВРДК при движении автомобиля по случайному профилю (Рис.8).

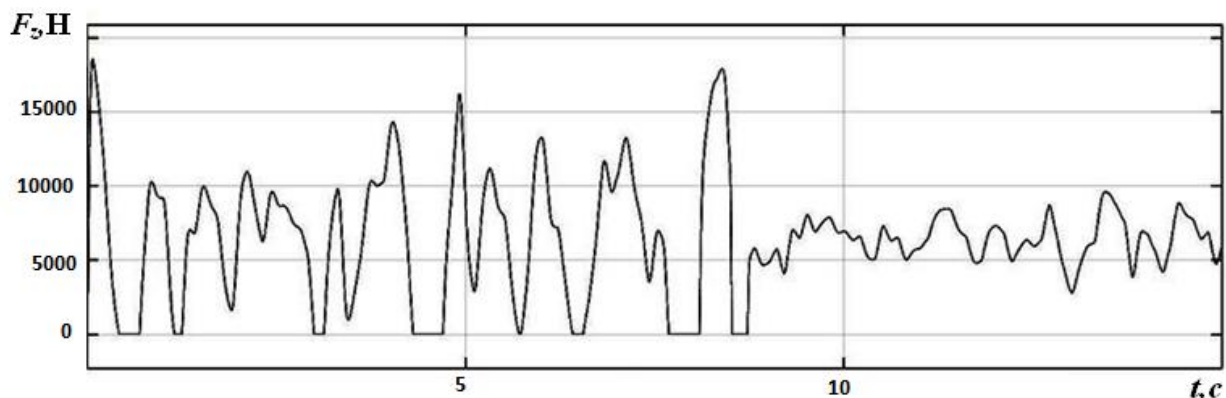


Рис. 8. Диаграмма колебаний вертикальной силы  $F_z$ , полученная в результате моделирования в пакете Matlab-simulink работы подвески одного колеса при движении автомобиля в режиме без работы СВРДК (0–8 с) и в режиме работающей СВРДК (8-15 с) на асфальто-бетонном покрытии при скорости движения 30 м/с

Экспериментальная часть работы выполнялась с целью показать адекватность динамических моделей подвески, используемых в работе и рабочих процессах, протекающих в них. Подвеска легкового автомобиля была смонтирована на стенде с гидравлическим пульсатором (Рис. 9).

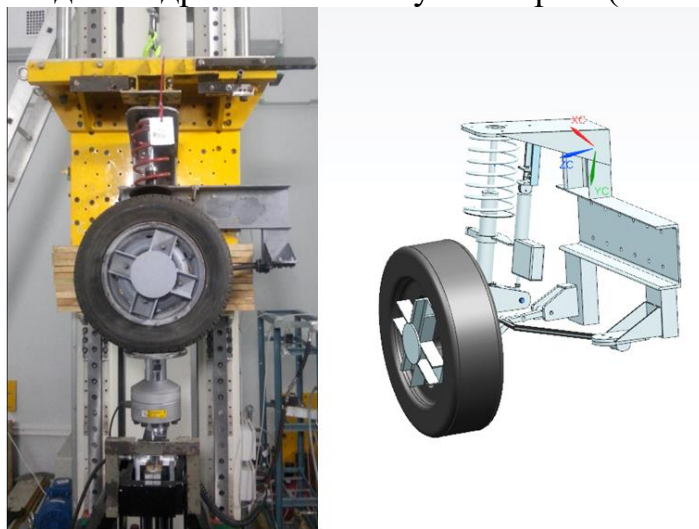


Рис. 9. Колесо с подвеской на вибростенде (слева), модель подвески колеса в программе NX.7 (справа)

При стендовых испытаниях регистрировались при кинематическом гармоническом возмущении сила в пятне контакта с плоской опорной поверхностью и деформация шины. На основании полученных данных определены петли гистерезиса для различных частот нагружения. В качестве примера на Рис. 10 показана нагрузочная характеристика шины при амплитуде 10 мм и частоте 5 Гц нагружения.

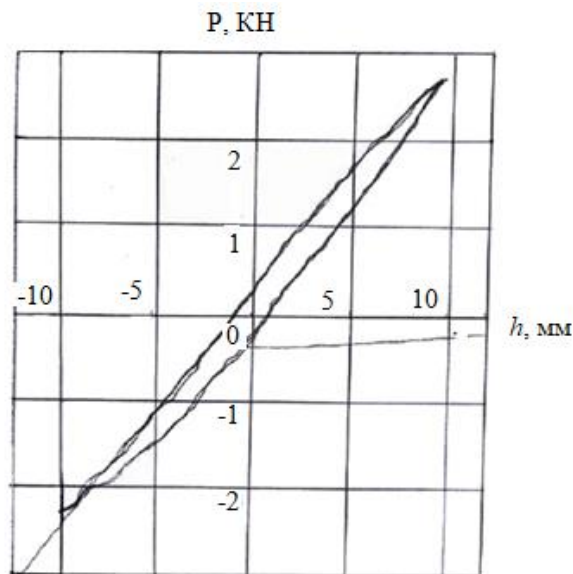


Рис. 10. Нагрузочная характеристика исследуемой автомобильной шины:  $P$  – вертикальная реакция в пятне контакта относительно статической нагрузки;  $h$  – прогиб шины в вертикальном направлении относительно статического прогиба

На стенде были проведены испытания, имитирующие кинематическое возбуждение подвески – воздействие на подвеску периодического профиля дороги. Частота воздействия стола стенда на шину варьировалась от 2 Гц до 16 Гц. Рис. 11 показывает, что в районе частоты собственных колебаний колеса при достаточном значении высоты периодического профиля дороги может возникать значительное ослабление вертикальной реакции на колесе, вплоть до потери контакта шины с дорогой.

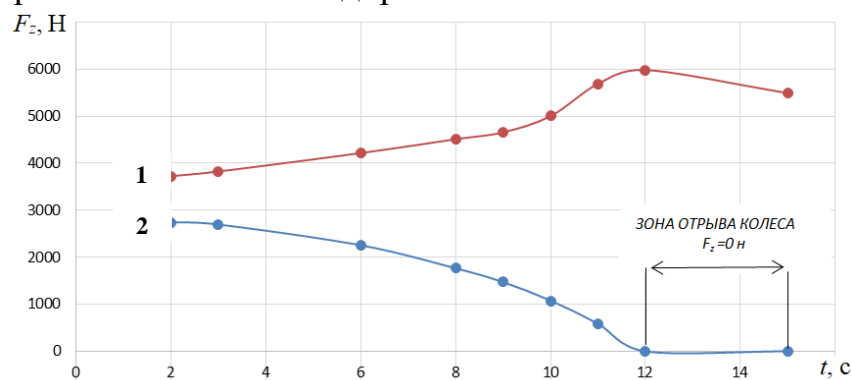


Рис. 11. Изменения максимумов (кривая 1) и минимумов (кривая 2) при колебаниях вертикальной силы на шине в функции частоты возбуждения на вибростенде

В третьей главе приводится анализ движения автомобиля, оборудованного системой СВРДК, в пространстве. Пространственное движение автомобиля представляется как движение твердого тела. Связь между кинематическими параметрами и внешними возмущениями устанавливается дифференциальными уравнениями, составляющими математическую модель

движения машины. В динамической модели автомобиля применяются три системы координат, неподвижная система координат  $O_2X_2Y_2Z_2$ , подвижная система координат  $O_1X_1Y_1Z_1$ , полуподвижная система координат  $OXYZ$  (Рис. 12) в соответствии со структурой и формой уравнений движения объекта.

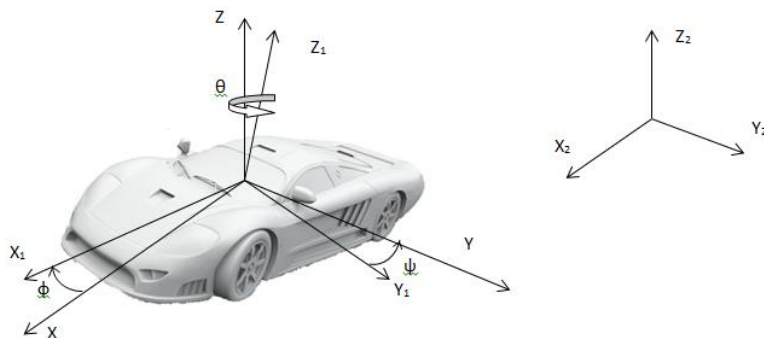


Рис. 12. Положение автомобиля в пространстве

Общие уравнения движения автомобиля в пространстве на оси системы  $OXYZ$

$$m\dot{V}_{cx} + m(\omega_y V_{cz} - \omega_z V_{cy}) = \sum_k F_k^x$$

$$m\dot{V}_{cy} + m(\omega_z V_{cx} - \omega_x V_{cz}) = \sum_k F_k^y$$

$$m\dot{V}_{cz} + m(\omega_x V_{cy} - \omega_y V_{cx}) = \sum_k F_k^z$$

$$A\dot{\omega}_x + (C - B)\omega_y \omega_z = \sum_k L_k^x ;$$

$$A\dot{\omega}_y + (A - C)\omega_x \omega_z = \sum_k L_k^y ;$$

$$A\dot{\omega}_z + (B - A)\omega_y \omega_x = \sum_k L_k^z ;$$

$$m_{1i} \ddot{z}_i = -c_{yi}(z_i - z_{2i} + A_{\Pi}) - k_{ai}(\dot{z}_i - \dot{z}_{2i}) - c_{\sigma}(z_i - z_{di} - r_{\sigma} t) - m_i g + c_{\sigma i}(z_{di} - z_i + A_{\sigma i}) + k_{\sigma i}(\dot{z}_{di} - \dot{z}_i) \quad i=1..4,$$

где:  $m$  – масса автомобиля;  $F_k^x$ ;  $F_k^y$ ;  $F_k^z$  – силы, действующие на корпус автомобиля;  $L_k^x$ ;  $L_k^y$ ;  $L_k^z$  – моменты, действующие на корпус автомобиля;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – осевые моменты инерции тела относительно трех ортогональных главных осей инерции;  $m_{li}$  – масса  $i$  – го колеса;  $Z_i$  – вертикальная координата центра масс  $i$  –го колеса

При движении автомобиля под действием внешних боковых сил меняются вертикальные и боковые силы, действующие на колеса в пятне контакта с дорогой. Вследствие этого возникают показатели снижения устойчивости движения автомобиля: боковой занос колеса, занос оси, занос всего автомобиля, отрыв колеса от дороги, опрокидывание автомобиля. Таким образом, поскольку все показатели уменьшения устойчивости движения автомобиля начинают проявляться после заноса одного из четырёх колес, в этой главе принимаем первый возникший занос в колесах, как индикатор начала потери устойчивости движения автомобиля. На Рис. 13 представлены кривые изменения боковой силы в функции угла увода колеса для различных типов дорожного покрытия.

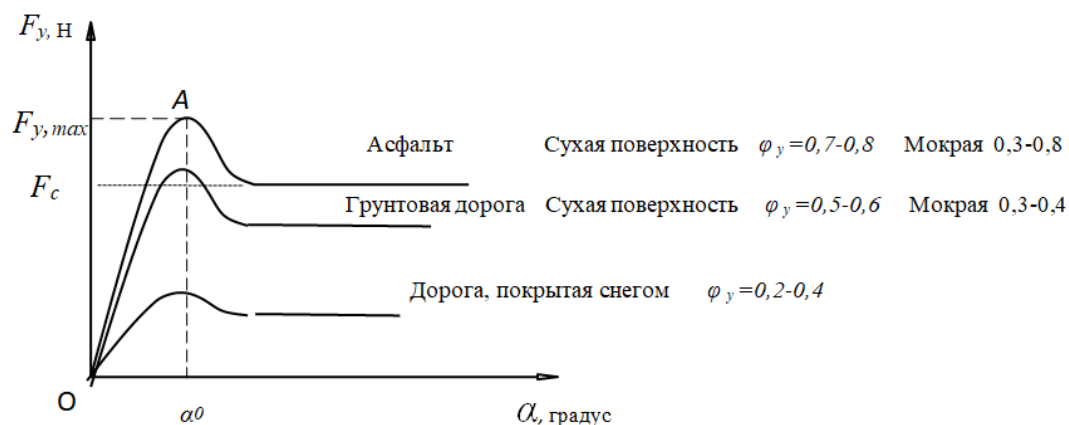


Рис. 13. Диаграмма изменения боковой силы в функции угла увода колеса для различных типов дорожного покрытия, формула Х.Пасейка  
Запас против заноса каждого колеса  $R_{yk}$  и запас против заноса оси  $R_{y,ось}$  определяются формулами

$$R_{yk} = F_{yk, max} - F_{yk} = \sqrt{(F_{zk}^2 \varphi^2 - F_{xk}^2)} - F_{yk}$$

$$R_{yk} = f(F_{zk}, F_{xk}); \text{ аналогично, } R_{y,ось} = f(F_{z,ось}, F_{x,ось}).$$

Представлено влияние вертикальных реакций дороги  $R_z$  на запас устойчивости оси автомобиля против заноса, откуда следует, что уменьшение амплитуды колебаний вертикальной реакции дороги на колесах, увеличивает запас устойчивости оси против заноса. Система стабилизации вертикальных реакций дороги на колесах автомобиля повышает запас устойчивости оси автомобиля против заноса.

Выполнено моделирование движения автомобиля, оборудованного системой СВРДК, по периодическому профилю для случая резонанса колес в следующих режимах: 1) при движении автомобиля по прямолинейной траектории под действием бокового ветра; 2) при движении автомобиля по кругу; 3) при выполнении маневра «переставка». Диаграмма, представленная на Рис. 14 показывает, что при движении автомобиля по профилю под действием бокового ветра, использование системы СВРДК стабилизирует сцепление колеса с дорогой и увеличивает запас устойчивости осей против заноса, вследствие чего уменьшается боковое отклонение оси от траектории движения, получаемой на ровной дороге.

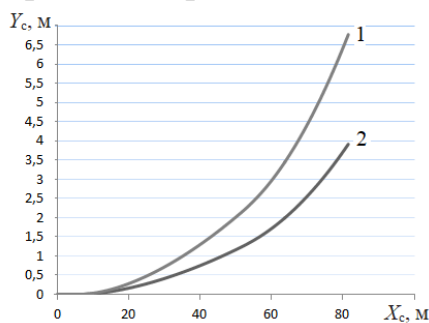


Рис. 14. Траектории центра масс при движении автомобиля под действием линейно возрастающей боковой силы: 1) без применения СВРДК; 2) с применением СВРДК

Проанализирована устойчивость движения легкового автомобиля при движении по кругу на периодическом профиле дороги с амплитудой 0,01м и 0,03м (Рис. 15). Для осуществления движения без бокового скольжения необходимо включить систему СВРДК, что позволяет получить более стабильный контакт между дорогой и колесами, повышая устойчивость движения автомобиля.

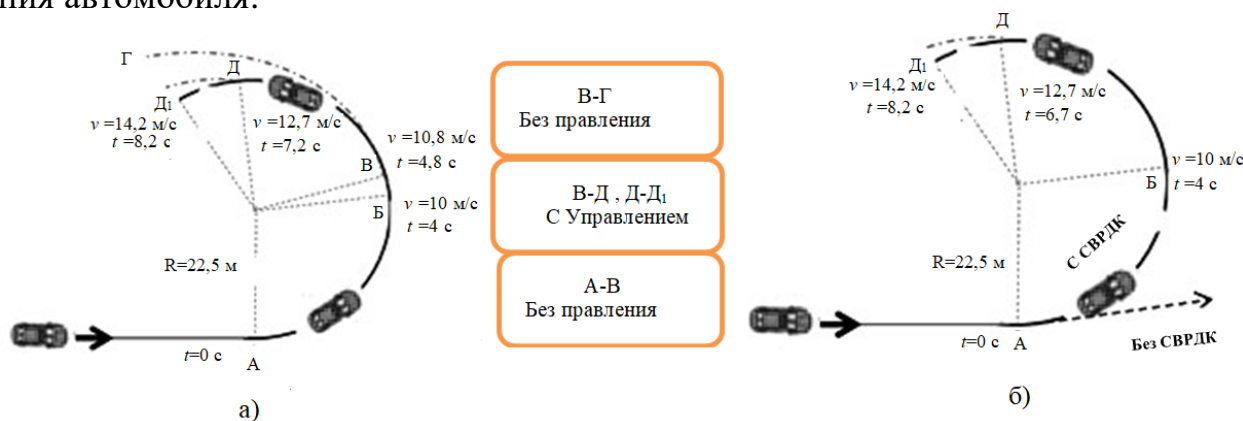


Рис. 15. Траектории движения накатом по кругу при движении с/без СВРДК по периодическому профилю дороги с амплитудой 0,01 м (а) и 0,03 м (б)

При моделировании маневра «переставка» с/без СВРДК и при движении по дороге с периодическим профилем, показано, что выполнение переставки в этом случае значительно труднее, чем на ровной дороге. Из рассмотрения результатов моделирования движения на переставке можно сделать вывод о том, что: 1) машина выполнит переставку в резонансном режиме колеса при амплитуде дороги не более 7 мм без применения системы стабилизации вертикальных реакций дороги на колесах; 2) применение системы СВРДК в режиме движения автомобиля на переставке стабилизирует вертикальные реакции дороги на колесах автомобиля, увеличивает запас устойчивости против заноса.

Оценку эффективности применения СВРДК можно выполнять с помощью параметра  $\mathcal{E}_{упр}$ , Рис. 16.

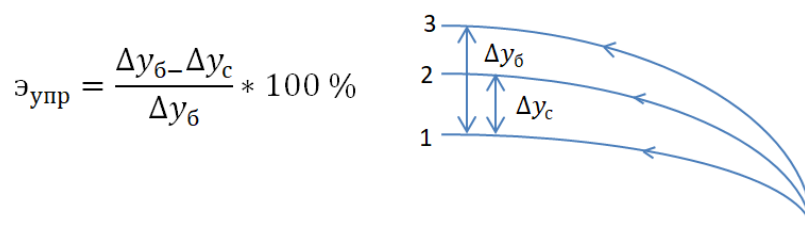


Рис. 16. К оценке эффективности применения СВРДК: 1) траектория движения автомобиля по ровной дороге; 2) траектория движения автомобиля по неровностям с СВРДК; 3) траектория движения автомобиля по неровностям без СВРДК

При движении автомобиля по прямой под действием бокового ветра, по кругу и при выполнении маневра «переставка» система СВРДК позволяет повысить поперечную устойчивость автомобиля в условиях движения по неровностям. Устойчивость движения автомобиля по периодическому профилю в резонансном режиме колеса практически близка к устойчивости автомобиля на ровной дороге. При работе системы СВРДК отклонение значения бокового перемещения автомобиля в движении по неровностям отличается не более, чем на 10%, от отклонения при движении по ровной дороге в зависимости от выбранной степени стабилизации.

Рассмотрено влияние системы СВРДК на работу антиблокировочной системы АБС автомобиля. Стабилизация вертикальной реакции дороги во всех случаях движения по неровной дороге позволяет получать максимальную эффективность от системы АБС. Максимальная эффективность применения СВРДК достигается при тормозном пути, равном тормозному пути, реализуемому на ровной дороге.

В процессе моделирования движения автомобиля по профилю, возбуждающему поперечные угловые колебания кузова с резонансной частотой, также получены результаты, подтверждающие эффективность управления стабилизацией вертикальных реакций для стабилизации положения кузова по углам крена и тангажа. При применении системы стабилизации вертикальных реакций максимальное значение амплитуды колебаний угла тангажа уменьшалось более, чем в 3 раза (от 8,5 до 2,5 градусов) и максимальное значение амплитуды колебаний угла крена уменьшалось более, чем в 2,5 раза (от 12,5 до 5 градусов).

**В четвертой главе** рассматриваются способы реализации системы управления вертикальными реакциями.

Представлен анализ способов измерения вертикальной реакции дороги на колесах автомобиля. Эффективность работы системы СВРДК во многом зависит от успешности оценки значений вертикальных реакций дороги на колесах автомобиля в движении. Рассматриваются несколько путей решения этой задачи.

Может оказаться эффективным применение метода опосредованного определения вертикальной силы, действующей на шину. Представим уравнение движения колеса по вертикальной оси

$$m_k \ddot{z}_k = F_{sch} - F_{susp} - m_k g ,$$

откуда сила, действующая со стороны дороги на колесо

$$F_{sch} = F_{susp} + m_k ( \ddot{z}_k + g ) .$$

Здесь:  $F_{sch}$  – вертикальная сила в шине,  $F_{susp}$  – сила в подвеске,  $m_k$  – масса колеса,  $\ddot{z}_k$  – вертикальное ускорение колеса.

Рассмотренные уравнения позволяют, применяя датчики вертикального ускорения массы колеса (укажем акселерометр CCLD 4507 Brüel &



Kjær) и датчики суммарной вертикальной силы в подвеске, вычислить вертикальную силу, действующую со стороны дороги на шину.

Основными проблемами, возникающими вследствие использования гидропривода в качестве исполнительного устройства, являются нелинейность и задержка реакции. Рассмотрено влияние упомянутых проблем на работу системы СВРДК и их решение. На Рис. 17 представлено влияние задержки системы СВРДК на степень стабилизации вертикальной реакции

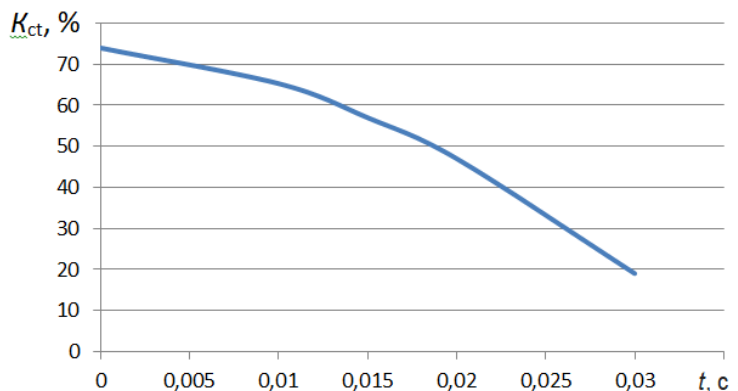


Рис. 17. Изменение степени стабилизация вертикальной реакции в функции времени отклика системы СВРДК

При значении времени отклика системы СВРДК не более 0,03 с, система может управлять процессом на частоте до 33,33 Гц. Чем меньше время отклика в системе СВРДК, тем выше степень стабилизации и более эффективна работа системы.

На практике при работе гидравлического привода может осуществляться нелинейная связь между значением управляющей силы и входным сигналом, например, значением радиальной силы, т.е. вертикальной реакции дороги. Нелинейность работы элементов гидравлики может уменьшать эффективность работы гидравлического привода. Избежать этого возможно при использовании пропорционального клапана. В конце главы рассмотрена возможность применения гидравлического привода управления подвеской для стабилизации вертикальных реакций дороги на колесах с гидроцилиндром одностороннего действия.

При применении предлагаемой конфигурации активной подвески возникает вопрос: каким образом сопротивление амортизатора влияет на работу системы СВРДК? При анализе работы видно, что амортизатор работает часто против актюатора. Это существенно влияет на мощность, затрачиваемую на управление работой системы СВРДК и на нагрев самого амортизатора. Решение этой проблемы возможно при добавлении второй системы, управляющей значением коэффициента сопротивления амортизатора.

Рассмотрена структура управления системы СВРДК (Рис. 18), предлагается использование метода управления с нечеткой логикой, что проверено на моделях с одним колесом.

Алгоритм работы системы управления заключается в том, что блок управления постоянно меняет параметры регулятора в зависимости от ам-



плитуды дороги с целью обеспечить необходимую степень стабилизации вертикальной реакции, позволяющую выполнить маневр с минимальной затратой энергии.

Адаптивность систем на базе нечеткой логики обеспечивает возможность настройки контроллера в соответствии с различными условиями эксплуатации, а также для различных дорог и режимов движения.

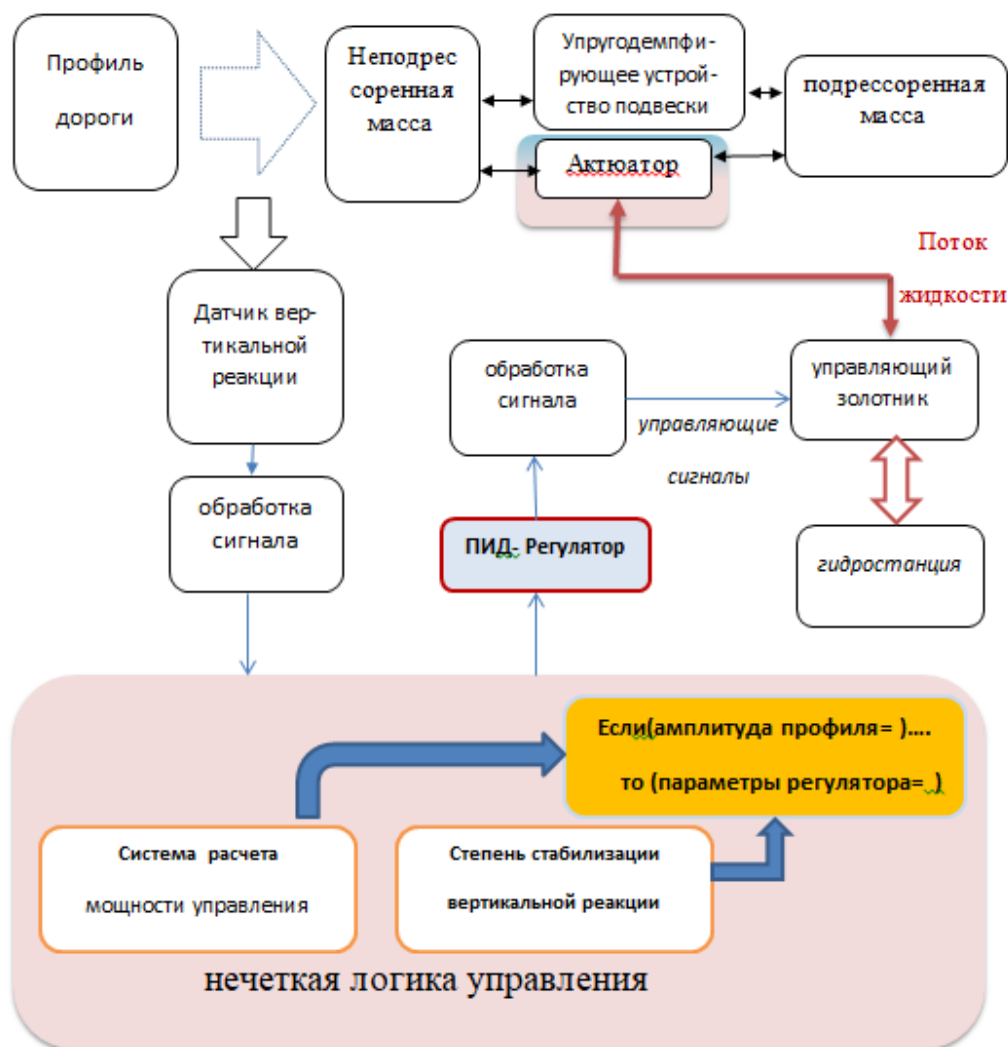


Рис. 18. Схема структуры управления СВРДК с использованием нечеткой логики

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложен новый метод повышения безопасности автомобиля, отличающийся тем, что путем стабилизации вертикальных реакций дороги на колесах при движении по неровностям позволяет увеличить устойчивость движения автомобиля.
2. Предложен новый критерий эффективности работы системы стабилизации вертикальных реакций дороги на колесе – степень стабилизации вертикальной реакции, позволяющий оценить степень снижения среднеквадратиче-

ского отклонения вертикальной реакции на колесе при использовании системы стабилизации вертикальных реакций дороги на колесе.

3. Методами имитационного моделирования установлено, что использование системы стабилизации вертикальных реакций дороги позволяет уменьшить среднеквадратическое отклонение колебаний вертикальных реакций дороги на колесе до 20–60% в зависимости от условий движения.
4. Выполненные расчеты показали, что система стабилизации вертикальных реакций дороги на колесах позволяет также уменьшить в 2–3 раза амплитуду вертикальных и угловых колебаний кузова по углу тангажа и по углу крена в зависимости от условий движения.
5. В процессе работы доказано, что система стабилизации вертикальных реакций дороги на колесе повышает эффективность действия антиблокировочной системы тормозов автомобиля: при совместной работе системы стабилизации вертикальных реакций дороги на колесе и антиблокировочной системы тормозов тормозной путь уменьшается на 24 – 77 % в зависимости от условий движения.
6. Установлено, что система стабилизации вертикальных реакций дороги на колесе при движении по неровностям опорного основания позволяет уменьшить боковое отклонение автомобиля от траектории, получаемой на ровной дороге, в зависимости от выбранной степени стабилизации на 10 – 100%.
7. Разработан алгоритм управления системы СВРДК, позволяющей обеспечить адаптивность к внешним условиям.

**Основные положения диссертации отражены в следующих работах:**

1. Рязанцев В.И, Альсаламех Бальсам. Стабилизация вертикальной реакции дороги на колесо при движении по периодическому профилю дороги // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. 2016. № 4(30). С.57-65. (1,8 п.л. / 1,2 п.л.).
2. Рязанцев В.И, Альсаламех Бальсам. Об одной системе активной безопасности автомобиля // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 8. С. 128-136. (1,7 п.л. / 1,1 п.л.).
3. Альсаламех Бальсам, Рязанцев В.И. Стабилизация вертикальных реакций дороги на колеса и плавность хода автомобиля//Известия высших учебных заведений. Машиностроение МГТУ им. Н.Э. Баумана.2017. № 5. С. 29-36. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-5-29-36.(1,45 п.л. / 1 п.л.).
4. Альсаламех Бальсам, Рязанцев В.И. Метод повышения устойчивости движения и плавности хода автомобиля //Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. ВОЛГ. 2017. № 3(20). С. 16-21 .(1,2 п.л./0,9 п.л.).
5. Рязанцев В.И., Альсаламех Бальсам, Левенков Я.Ю. Проблемы реализации системы управления вертикальными реакциями// Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал «МАМИ».2017 .№ 3 (33) . С. 41 – 48. (1,25 п.л. / 0,8 п.л.).