

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЖЁСТКОСТЬЮ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ

М. Э. Азизов, Ю. А. Федотов

В данной работе создана теоретическая база для создания собственной системы регулирования жесткости подвески автомобиля, с учётом недостатков уже существующих систем: разработаны структурная и электрическая принципиальная схемы, выбрана элементная база, разработан алгоритм работы системы при различных ситуациях во время движения автомобиля, разработано программное обеспечение для контроллера, управляющего системой. Проведено моделирование системы управления в программном пакете Amesim, которое свидетельствует об увеличении безопасности и комфорта при движении автомобиля, оснащённого данной системой, а также доказано снижение нагрузок на элементы подвески на 15–17 % по сравнению с пассивной системой.

Ключевые слова: адаптивная подвеска, регулируемая подвеска, Skyhook, лазерные дальнометры, электромагнитные клапаны, моделирование системы, четверть массы автомобиля, Amesim.

Развитие упруго-демпферных систем автомобиля началось с самого появления автомобиля, а исследования в этой области ведутся и по сей день. 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, однако все эти системы применяются исключительно в автомобилях премиум сегмента, что обусловлено высокой стоимостью таких систем [1]. Сегодня существует тенденция к разработке всё более доступных или же более эффективных систем адаптивной подвески.

Целью работы являлась разработка автоматизированной системы управления жесткостью подвески автомобиля или, другими словами, системы адаптивной подвески автомобиля, которая способна регулировать характеристики амортизаторов, тем самым обеспечивая все основные функции аналогичных систем. К таковым относятся: 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. Также данная система должна изменять характеристики подвески в зависимости от скорости движения автомобиля, обеспечивать управление подвеской в широком диапазоне скоростей и быть как можно проще, что положительно скажется на её стоимости, надежности и ремонтпригодности.

Первостепенным вопросом при разработке адаптивной подвески оказался выбор типа исполнительного устройства.

© Азизов М. Э., Федотов Ю. А., 2020.

Азизов Мират Эльверович (mirat.azizov@mail.ru), студент IV курса института двигателей и энергетических установок;

Федотов Юрий Аркадьевич (fedyuri1@rambler.ru), доцент кафедры автоматических систем энергетических установок Самарского университета,

443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34.

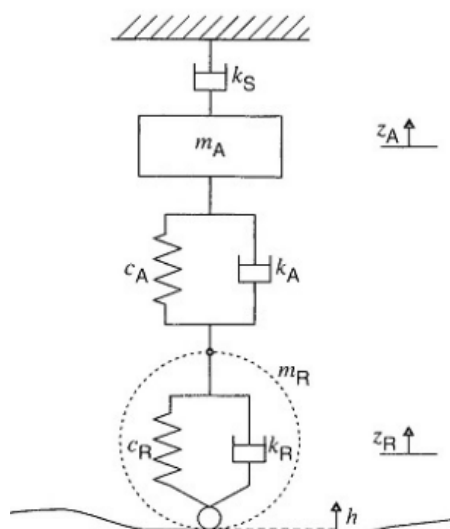


Рис. 1. Теоретический принцип метода Skyhook

В данной работе в качестве исполнительных элементов системы были выбраны регулируемые амортизаторы с электромагнитным клапаном, в силу их более линейных характеристик при регулировании, меньшей стоимости и большей распространенности в современных автомобилях, а значит и доступности по сравнению с амортизаторами, использующими свойства магнитоэологической жидкости.

Отличительной чертой разработанной системы стало применение лазерных дальнометров, которые должны определять рельеф дорожного полотна в реальном масштабе времени, а также в силу своего расположения под передним бампером автомобиля должны позволить подавать сигнал управления на исполнительные органы заблаговременно, до наезда колеса на неровность, таким образом снижая влияние апериодичности регулирующих электромагнитных клапанов, интегрированных в амортизаторы.

Метод управления

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 данной работе в качестве метода управления выбран Skyhook, используемый

во многих существующих системах адаптивной подвески [2]. Подробное описание данного метода приведено в работе [3]. Он был запатентован в 1974 году Карнопом. Главным образом метод направлен на сохранение неподвижного положения поддрессоренных частей автомобиля в вертикальной плоскости независимо от текущих параметров дорожного покрытия. Он предназначен в первую очередь для повышения комфорта при вождении. Для изолирования кузова автомобиля от внешних колебаний мысленно представляют, что он соединен амортизатором с небом или воображаемой инерциальной системой отсчета в виде горизонтальной линии (рис. 1).

Сила данного амортизатора зависит от его жесткости k_S и вертикальных скоростей поддрессоренных и неподдрессоренных частей подвески \dot{z}_A и \dot{z}_R . Рассчитывается она по следующей формуле:

$$F_{SH} = \begin{cases} k_S * \dot{z}_A, & \text{если } \dot{z}_A * (\dot{z}_A - \dot{z}_R) \geq 0 \\ 0, & \text{если } \dot{z}_A * (\dot{z}_A - \dot{z}_R) < 0 \end{cases}$$

Таким образом, данный метод позволяет рассчитать усилие, которое необходимо приложить к кузову автомобиля для устранения его колебаний вдоль вертикальной оси. Он является наиболее подходящим для применения в разработанной системе в силу своей простоты и эффективности. Стоит отметить, что выбор датчиков, необходимых для работы системы в большей степени обусловлен использованием метода Skyhook.

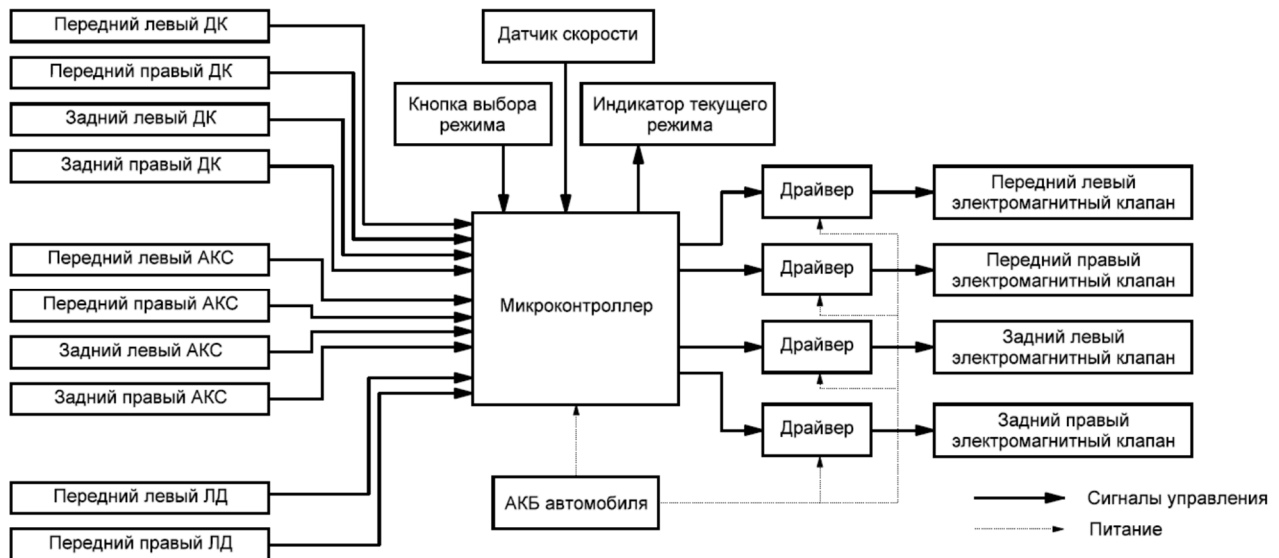


Рис. 2. Структурная схема системы

Разработка системы

В результате выполнения работы была составлена структурная схема системы, в состав которой вошли: 4 акселерометра; 4 датчика клиренса; 2 лазерных дальнометра; датчик скорости движения автомобиля; кнопка управления режимами, индикатор текущего режима; электромагнитные клапаны, интегрируемые в конструкцию регулируемых амортизаторов; драйверы к ним; а также микроконтроллер в качестве управляющего устройства (рис. 2).

Помимо этого был разработан алгоритм работы всей системы, который позволяет: уменьшить крена корпуса автомобиля при разгоне/торможении или же повороте влево/вправо; снизить шум и вибрации, передающиеся в салон автомобиля при езде путём независимого управления жесткостью каждого амортизатора; настроить жесткость подвески под определённый режим, выбираемый водителем; изменять характеристики подвески в зависимости от скорости движения автомобиля.

По разработанной структурной схеме и алгоритму была выбрана элементная база и составлена принципиальная электрическая схема. В качестве управляющего устройства была выбрана платформа Arduino Mega 2560 построенная на микроконтроллере

ATmega2560. Для данного устройства написана и успешно скомпилирована программа в среде Arduino IDE.

Разработка модели системы

В ходе работы также были разработаны две модели (адаптивной системы с использованием метода Skyhook и пассивной системы) в программном пакете Amesim для того, чтобы оценить общую эффективность работы разработанной системы, найти её оптимальные параметры, а также для наглядного представления работы адаптивной подвески и сравнения её с пассивной подвеской. Модели содержали в себе элементы планарной механики, имитирующие подрессоренную четверть массы автомобиля, датчики вертикальной скорости корпуса автомобиля и колеса, а также звенья цепи управления (рис.3). Возмущающее воздействие для каждой модели создавалось посредством гидроцилиндра, который управлялся с помощью пропорционального распределителя. На вход распределителя были поданы случайные сигналы различной частоты и амплитуды, а также трапецеидальный сигнал. Основные параметры моделей выбраны в соответствии с данными, приведенными в работе [4] и представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры моделей

Параметр	Адаптивная модель	Пассивная модель
Подрес. масса m_A , кг	350	350
Неподрес. масса m_R , кг	25	25
Жесткость пружин c_A , $\frac{H}{M}$	22000	22000
Коэф. демпфирования k_A , $\frac{H \cdot c}{M}$	300...3000	1200
Коэф. Skyhook k_S , $\frac{H \cdot c}{M}$	1900	—

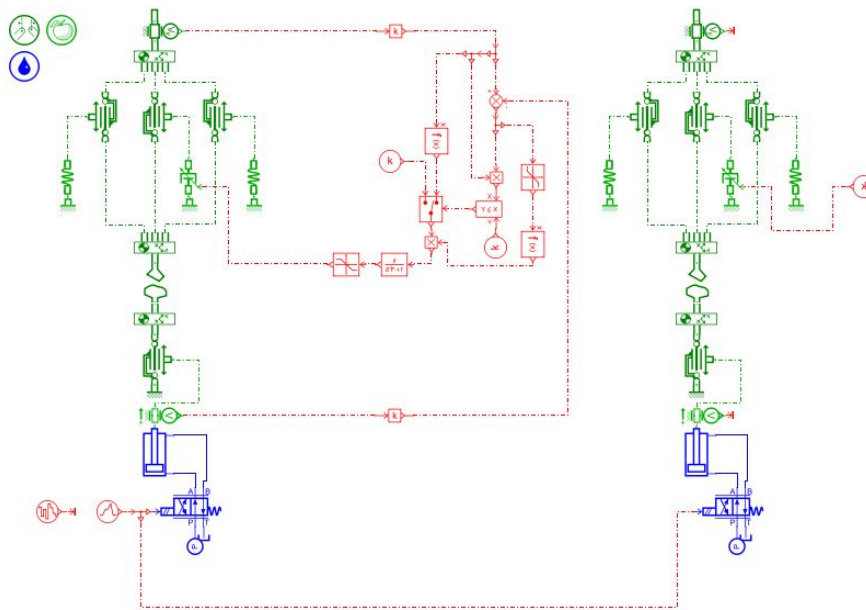


Рис. 3. Внешний вид окна разработки скетча

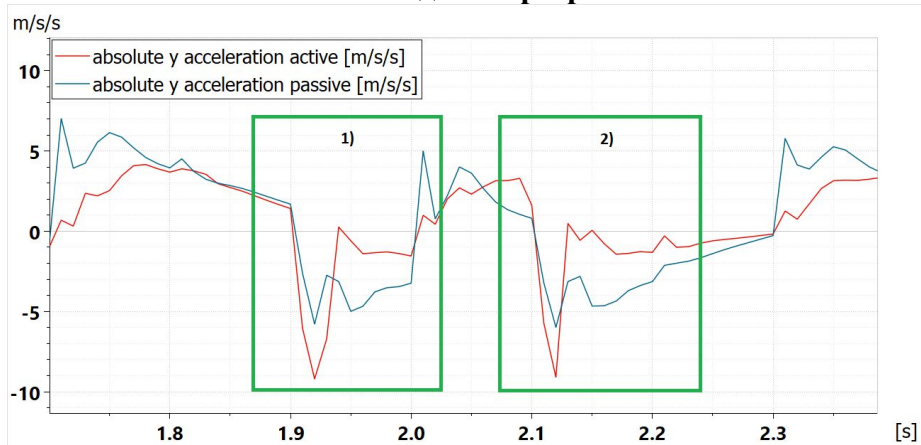


Рис. 4. Участки отрыва колеса от дорожного покрытия

Результаты испытаний моделей

В результате проведения трёх серий экспериментов были получены зависимости вертикальных перемещений и ускорений подвески от времени для каждой модели при различных возмущающих воздействиях. Данные зависимости, полученные для разработанной адаптивной системы, были сравнены с аналогичными зависимостями, полученными для пассивной подвески.

При сравнении был выявлен наиболее подходящий диапазон регулирования (300–3000 $\frac{H \cdot c}{M}$), который позволяет добиться не только хорошего демпфирования низкочастотных колебаний подвески, но и не допускает повышения уровня высокочастотных вибраций, передаваемых на корпус через подвеску.

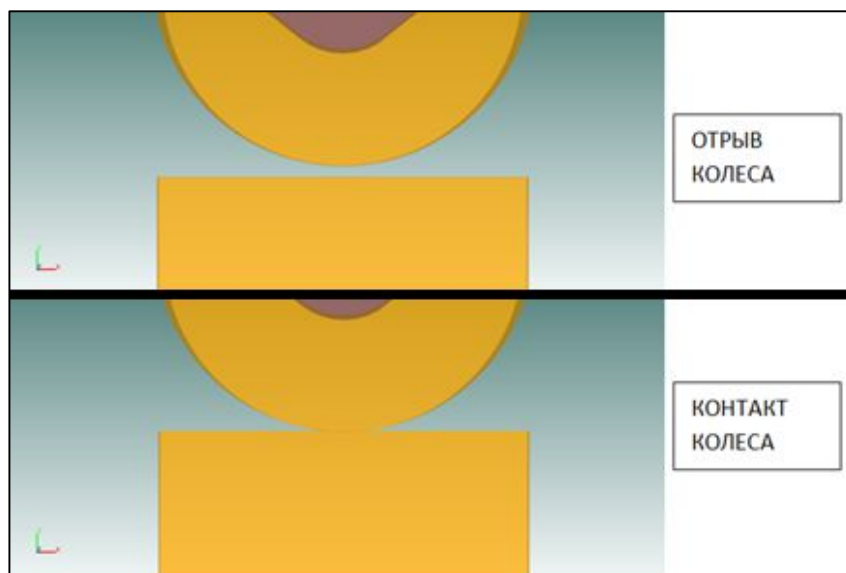


Рис. 5. Отрыв колеса и контакт колеса с дорожным покрытием

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

Заключение

В результате выполнения данной 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.

Литература

1. Устройство и принцип работы адаптивной подвески. URL: <https://techautoport.ru/hodovaya-chast/podveska/adaptivnaya-podveska.html> (дата обращения 25.04.2020).
2. Pellegrini E. Model-Based Damper Control for Semi-Active Suspension Systems: dissertation... candidate of engineering sciences. Munich, 2012. 196 p.
3. Gopala Rao V., Narayanan S. Sky-hook control of nonlinear quarter car model traversing rough road matching performance of LQR control. Journal of Sound and Vibration: India, 2009. 16 p.
4. General Theory of Skyhook Control and Its Application to Semi-Active Suspension Control Strategy Design. / Liu C., Chen L., Yang X. [et al.] // IEEE Access, China.2019. 9 p.

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR CAR SUSPENSION'S RIGIDNESS

M. E. Azizov, Y. A. Fedotov

In this work, a theoretical basis has been created for creating our own system for controlling the suspension stiffness of a car, taking into account the shortcomings of existing systems: a structural and electrical circuit diagram has been developed, an elemental base has been selected, an algorithm has been developed for the system to work in various situations while the car is moving, software has been developed for the controller controlling the system. The control system was simulated in the Amesim software package, which indicates an increase in safety and comfort when driving a vehicle equipped with this system, as well as a 15-17% reduction in load on the suspension elements compared to a passive system.

Key words: adaptive suspension, adjustable suspension, Skyhook, laser rangefinders, solenoid valves, system simulation, a quarter of the mass of the car, Amesim.

Статья поступила в редакцию 08.07.2020 г.

© Azizov M. E., Fedotov Yu. A., 2020.

Azizov Mirat Elverovich (mirat.azizov@mail.ru), student IV course of the Institute of engines and power plants;
Fedotov Yuri Arkad'yevich (fedyuri1@rambler.ru), associate professor of the Department of Power Plant Automatic Systems of the Samara University,
443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34.