

AdCAS - система автономного адаптивного управления активной подвеской автомобиля¹

А.А. Жданов, Д.Б. Липкевич²

Аннотация. Представлена система AdCAS (Adaptive Control of Active car Suspension), разработанная на основе метода автономного адаптивного управления (ААУ) и предназначенная для автоматического адаптивного управления активной подвеской транспортного средства, а также результаты компьютерного моделирования процесса работы этой системы.

1. Введение

1.1. Подвеска автомобиля. Активная подвеска. Существующие системы управления подвеской

Подвеска автомобиля (рис. 1) выполняет одновременно несколько важных функций, от ее конструкции и рабочих характеристик зависят управляемость, устойчивость, плавность хода и другие свойства автомобиля, определяющие его безопасность, комфортность, надежность и экономичность. Так, на динамичность, устойчивость и управляемость автомобиля влияют кинематические характеристики подвески. Надежность автомобиля во многом зависит от надежности колес и подвески, так как они находятся ближе всего к дороге и подвергаются самым тяжелым условиям эксплуатации. От свойств подвески зависит физиологическое и эмоциональное состояние водителя и пассажиров, поскольку вибрации, быстрые и резкие изменения положения тела сильно утомляют человека, известно, что усталость напрямую зависит от изменений ускорения и частоты колебаний.

Основная проблема конструирования подвесок состоит в том, что требования к подвеске со стороны устойчивости, управляемости и комфортности оказываются противоречивыми. Так, с одной стороны, подвеска должна быть по возможности более мягкой, чтобы исключить отрыв колес от дорожного полотна при наезде на неровность,

а также увеличить комфортность автомобиля для пассажиров и водителя, обеспечить сохранность перевозимых грузов. С другой стороны, подвеска должна быть по возможности более жесткой, чтобы увеличить устойчивость и управляемость автомобиля, именно – чтобы не возникали опасные крены на поворотах, не было клевков корпуса автомобиля при разгоне и торможении, разгружающих переднюю или заднюю оси автомобиля.

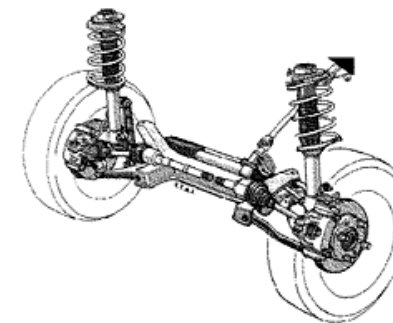


Рис. 1. Пример подвески легкового автомобиля.

При описании подвески одного колеса учитывают (рис. 2): упругую шину, неподдрессоренную массу m (колесо и части подвески), параллельно соединенные упругий (пружина) и демфирующий (амортизатор) элементы, которые поддерживают корпус автомобиля – поддрессоренную массу M (масса $\frac{1}{4}$ части корпуса автомобиля). Упругие элементы принимают на себя удары со стороны неровностей дорожного покрытия, преобразуя их в затухающие колебательные движения, а демпфер гасит эти колебания.

Свойства подвески определяются ее характеристиками, основные из которых описывают упругость пружины и вязкость амортизатора в зависимости от различных фаз их движения.

В большинстве обычных автомобилей характеристики подвески выбираются в результате поиска компромисса между противоречивыми требованиями устойчивости, управляемости и комфортности. Характеристики подвески оптимизируют с точки зрения среднестатистических условий, в которых будет работать данный автомобиль. Рассчитывается усредненное значение массы автомобиля с учетом возможного веса его груза, оценивается и учитывается характер и качество дорожного покрытия тех дорог, для которых разрабатывается данный автомобиль, требования к динамическим свойствам данного автомобиля, зависящие от его назначения (спортивный автомобиль, пассажирский, грузовой, специальный и т.п.). Характеристики таких подвесок не

¹ Работа поддержана проектом с ATS Soft

² В работе принимали участие также В. Погребняк, Х. Саргсян, А. Есенков, А.Бойченко, А. Рапопорт и другие.

меняются в процессе эксплуатации автомобиля, если не считать изменений, связанных с износом деталей подвески.

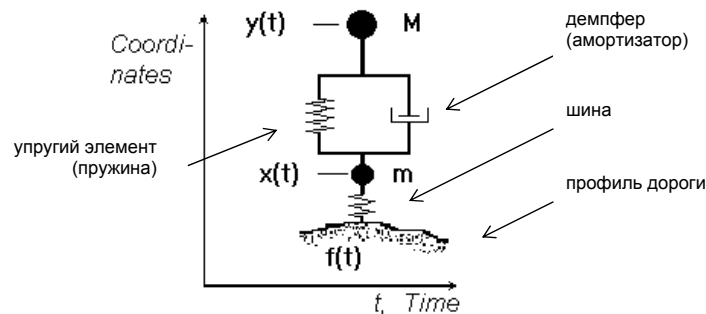


Рис. 2. Схема подвески одного колеса автомобиля; $x(t)$ – вертикальная координата оси колеса, $y(t)$ – вертикальная координата корпуса автомобиля в опорной системе координат, t – время.

Однако очевидно, что подвеска, оптимизированная по всему диапазону условий эксплуатации автомобиля, оказывается неоптимальной в каждой из конкретных текущих дорожных ситуаций, отличающихся от расчетной среднестатистической. Так, при движении автомобиля по сравнительно гладкой дороге оптимальной является более жесткая подвеска, при движении этого же автомобиля по неровной дороге хотелось бы, чтобы подвеска становилась более мягкой. При движении по прямому участку дороги можно иметь более мягкую подвеску, увеличивающую плавность хода, а при прохождении поворотов, при разгоне и торможении подвеска должна становиться более жесткой, чтобы обеспечить устойчивость автомобиля, не допускать большого крена, тем более – опрокидывания. Хотелось бы также изменять жесткость подвески при изменении веса груза. Имеются и много других факторов, от которых могут зависеть желаемые оптимальные в текущих условиях характеристики подвески (ускорение автомобиля, радиус поворота и т.п.).

Уже давно появились попытки конструирования таких подвесок, которые позволяли бы управлять их характеристиками вручную или автоматически. Например, водителю предоставляется возможность настраивать подвеску перед выполнением конкретной поездки в соответствии с ее планируемыми свойствами. Так, в некоторых автомобилях можно изменять высоту клиренса (дорожного просвета), или жесткость подвески,

выбирая из двух-трех вариантов – спортивного (жесткая подвеска) или обычного (мягкая подвеска). Например, в подвеске “Hydractive”, устанавливавшихся на автомобилях *Citroen XM*, упругость подвески регулировалась пневматическими амортизаторами: на каждом мосте устанавливалось три пневматических резервуара, работающих в роли амортизатора. У водителя имелся кран, которым он мог задействовать только два, либо все три резервуара. В первом случае подвеска становилась более жесткой, во втором – более мягкой, чем и обеспечивалось изменение свойств подвески. Водитель мог также изменить клиренс, например, в зависимости от скорости движения, качества дороги, а также при остановке автомобиля.

Иногда обеспечивается возможность изменения характеристик подвески вручную непосредственно в процессе движения автомобиля. Однако такие манипуляции могут отвлекать водителя от управления автомобилем и известны случаи, когда это увлекательное занятие приводило к авариям. Подвески, параметры которых могут изменяться с целью управления, стали называть «активными», однако это не строгий термин, и в каждом случае полезно уточнить, что именно имеется в виду. Это же касается и слова «адаптивный», под которым может пониматься что угодно, начиная от возможности регулирования подвески вручную.

Попытки построения подвесок, параметры которых изменялись бы автоматически в зависимости от некоторых текущих условий, привели к появлению различных идей, которые можно подразделить на три класса.

Один класс представлен подвесками, у которых характеристики изменяются в результате некоторых чудес механики, гидравлики или пневматики. Например, специальное устройство пружинно-листовых амортизаторов *Roadmaster* делает подвеску тем более жесткой, чем больше вес автомобиля. Другим примером является называемая «активно-реактивной» или «активно-пассивной» подвеска *Monroe Kinetic*, где гидравлические диагональные связи между подвесками каждого из четырех колес, позволяют без использования процессоров, датчиков и приводных механизмов «информировать» каждое колесо о том, что происходит с другими, создавая определенное корректирующее смещение колес в разных ситуациях, например, во время поворотов или при наезде одного колеса на препятствие. Функциональное разнообразие действий таких подвесок не велико, при этом требуется установка дополнительного сложного технического и/или гидравлического оборудования, что утяжеляет машину, снижает ее надежность.

К другому классу можно отнести подвески, системы управления которых работают на основе электронных схем или контроллеров, реализующих значение параметров подвески по некоторому детерминированному закону. Такие системы требуют оснащения подвески определенными датчиками, и исполнительными устройствами. Контролер устанавливает фиксированное отображение показаний датчиков в заранее определенные команды исполнительным устройствам, реализующим указанные

значения параметров подвески. Очевидно, что таким способом можно реализовать гораздо более сложные детерминированные законы управления, чем посредством механических и гидравлических устройств. Такого рода системы могут управлять подвеской гораздо более динамичнее, чем это может делать человек-водитель, и могут делать это более точно. Основные проблемы этого класса систем связаны как с трудностями построения точной математической модели автомобильной подвески, так и с необходимостью создания специальных исполнительных устройств-актуаторов.

Поскольку автоматическая система может управлять не только выбором из двух-трех вариантов, но гораздо большим их числом, то возникает соблазн оснастить подвеску такими управляемыми элементами, которые допускали бы выбор между большим числом дискретных вариантов параметров или изменений их континуальных значений. Примером таких управляемых механизмов, которые можно было бы использовать в качестве исполнительных устройств - актуаторов в подвеске, является амортизатор с переменной вязкостью. Напомним, что демпфирующее свойство амортизатора достигается за счет того, что при сжатии или растяжении амортизатора в нем осуществляется перекачивание жидкости (масла) из одного резервуара в другой через узкий клапан. Изменяя диаметр пропускного отверстия клапана, можно в широком диапазоне изменять характеристику амортизатора. Поскольку не составляет большого труда сделать клапан с управляемым отверстием, то такой амортизатор является удобным актуатором. Амортизаторы такого типа использовались, например, в управляемых подвесках самолетов – шасси. Быстродействие такого актуатора довольно высокое, оно ограничивается возможностями переключающего механического устройства клапана. Однако еще более быстродействующим актуатором может являться амортизатор переменной вязкости, в котором в качестве жидкости используется так называемая магнито-реологическая жидкость (MRF), которая представляет собой суспензию в масле очень мелкодисперсных металлических магнитных частиц – диполей. Металлические диполи могут управляться внешним магнитным полем, создаваемым соленоидом, заставляющим их одновременно ориентироваться в заданном направлении, например, вдоль или поперек потока жидкости, что и приводит к изменению вязкости MRF в заданном направлении. Такой актуатор имеет очень высокое быстродействие, он может переключаться до 1000 раз в секунду. Высокое быстродействие системы и широкий диапазон рабочих режимов делают ее очень эффективной. Примером подвески с MRF является подвеска *MagneRide*, устанавливаемая на автомобилях *Cadillac Catera*. Помимо таких пассивных управляемых элементов подвески были разработаны также активные элементы, например, амортизатор, в который из внешнего резервуара под высоким давлением может впрыскиваться, или, наоборот, откачиваться масло. Такой амортизатор сам может активно воздействовать на автомобиль, надо лишь правильно управлять этими воздействиями. Быстродействие такого актуатора заметно уступает системам с MRF, однако в целом эффективность его может быть выше за счет активного и сильного воздействия на подвеску. Примером такого рода активной

подвески является подвеска “*Active Body Control*” (ABC), которой с 2002 года оснащаются автомобили *Mercedes Benz CL500* и *CL600*. При помощи гидравлики высокого давления, многочисленных датчиков и мощных микропроцессоров эта активная подвеска мгновенно подстраивает поддрессирование кузова под соответствующую дорожную ситуацию. Таким образом ABC на 68 % уменьшает перемещения кузова при разгоне, движении в повороте и при торможении. Повороты *Mercedes Benz CL500* проходит со значительно меньшими кренами и обеспечивает при резких маневрах объезда более высокий уровень безопасности, чем автомобили с традиционными системами подвески. При тесте „змейка” динамический крен кузова в зависимости от ситуации снижается на 50 % по сравнению со значениями предыдущей модели CL с пассивной подвеской и демпфирующей системой. Недостатком такой системы является повышенный расход топлива, требуемый для приведения в действие такой активной подвески.

Вторая проблема, с которой сталкиваются разработчики управляемых подвесок такого класса, состоит в следующем. Закон управления актуатором в зависимости от показаний датчиков, даже если он детерминированный, должен быть рассчитан заранее и зафиксирован в каком-либо виде в контроллере. Такой закон управления рассчитывается на основании анализа математической модели динамики объекта управления - движения корпуса и подвески автомобиля в тех или иных возможных условиях. Составляется математическая модель объекта управления и находится ее обратное решение, которое указывает, какие управляющие воздействия следует развить актуатору, чтобы в текущих условиях привести объект управления к заданному желаемому состоянию. Математическая модель обычно представляет собой большую систему нелинейных дифференциальных уравнений, которые описывают движение как твердотельных элементов автомобиля, так и его осциллирующих элементов. Значения коэффициентов подбираются по результатам стендовых испытаний. Проблема состоит в том, что разработать точную математическую модель автомобиля очень трудно. Попытки учесть чуть более сложные и реалистические элементы автомобиля делают его математическую модель чрезмерно сложной и не поддающиеся расчетам. Ситуацию усложняет то обстоятельство, что свойства реального автомобиля постоянно изменяются даже в течение одной поездки – изменяется его масса в результате изменения числа пассажиров или массы груза, изменяется температурный режим, свойства конструктивных элементов, свойства дороги, режим движения. Поэтому всякая зафиксированная математическая модель в целом оказывается неверной, а качество управления, следовательно, ограничено. В этом классе существуют и адаптивные системы управления, которые строятся на эмпирическом уточнении значений параметров, при условии, что заранее известен набор характеристик, влияющих на целевую характеристику, и общий вид зависимости между характеристиками, т.е. решается задача идентификации модели. Несмотря на то, что теория этих систем весьма сильно развита, создается впечатление, что возможности

классической математики для построения математических моделей такого рода объектов приближаются к своему пределу.

К третьему классу можно отнести активные подвески, управляющие системы которых строятся не на основе математических моделей, а на основе подходов, характерных для задач анализа «черного ящика», или задач управления «по прецедентам». Это системы нового поколения, основанные на идеях самообучения, автоматической работы со знаниями, с автоматическими распознающими системами, использующие нечеткую логику, нейросети, гибридные системы и т.п. подходы. Работы над такими активными подвесками ведутся в настоящее время в ряде автомобильных компаний, но особенности технологии, реализованные в анонсируемых образцах, как правило, не освещаются. Из общих соображений можно предполагать, что все такого рода системы управления активными подвесками, даже если они эвристические, можно отнести к одному из направлений, известных сегодня в области управляющих систем: это экспертные системы, системы нечеткой логики, нейросети, системы с подкрепляющим обучением. Достоинством такого рода управляющих систем является то, что они основаны не на математических моделях объектов управления. Закон управления в них получается либо в результате автоматического обучения по прецедентам, либо в результате перенесения в управляющую систему формализованных знаний человека-эксперта. Каждый из названных здесь методов управления имеет свои ограничения, особенности и недостатки, а также способы сглаживания этих недостатков. Коротко обозначим их.

Экспертные системы позволяют зафиксировать знания человека-эксперта, который хорошо принимает решения в некоторой области, и затем тиражировать эти способности. Нечеткие системы являются разновидностью экспертных систем и удобны для построения управляющих систем. Однако в своих канонических вариантах эти системы не предполагают автоматического доучивания или переучивания, т.е. автоматической адаптации, их правила принятия решений задаются вручную при конструировании таких систем. Очевидно, что в области управления подвеской не существует экспертов, умеющих быстро и правильно менять параметры подвески, к тому же здесь требуется постоянное переучивание системы управления. Нейронные сети в своем каноническом виде предназначены для распознавания образов, которым они предварительно были обучены по обучающей выборке. Переобучение нейросети в процессе работы (что собственно и обеспечивает адаптивное управление) вызывает уже серьезные проблемы. К тому же и предварительное обучение связано с трудностью подготовки обучающей выборки прецедентов, трудоемкостью обучения нейросети, проблемами сходимости. Системы с подкрепляющим обучением – одно из наиболее перспективных направлений, также имеют свои органические трудности. В каждой из названных областей проводятся исследования, направленные на поиск путей обхода соответствующих проблем.

Метод *автономного адаптивного управления* (ААУ) [1] относится к последнему из указанных классов систем управления, имеет свои достоинства и свои недостатки. Как

показывают наши исследования, он может быть эффективно применен для построения системы управления активной подвеской. Опишем основные результаты проведенного нами моделирования.

2. Применение метода ААУ для управления активной подвеской

Идея применения метода ААУ для управления активными подвесками состоит в следующем. Какой бы актуатор ни предполагалось использовать в активной подвеске, всегда встает проблема построения закона управления этим актуатором. Управляющая система (УС), построенная по методу автономного адаптивного управления (ААУ), позволяет избежать разработки точной математической модели объекта управления (ОУ), поскольку система ААУ автоматически находит отображения из множества показаний датчиков в множество команд актуатора, соотнося их также с множеством заданных качественных оценок возможных состояний. Найдя эмпирически такие соотношения, управляющая система опирается на них при принятии решений. Целевые состояния, которых стремится достичь УС, определяются этими качественными оценками, которые и указывают УС, какие состояния ОУ являются предпочтительными. Соответственно, для построения УС по методу ААУ требуется, чтобы датчики и актуаторы обеспечивали наблюдаемость и управляемость [2] ОУ, и были бы правильно заданы качественные оценки состояний, определяющие цели управления.

2.1. Вариант системы AdCAS с амортизатором переменной вязкости

Наиболее простым вариантом применения метода ААУ для управления активной подвеской является применение амортизатора с магнито-реологической жидкостью (MRF), имеющей переменную вязкость [3]. Движение амортизатора при его сжатии называется «сжатием», а при растяжении – «отбоем». Напомним, что обычный серийный амортизатор обеспечивает демпфирование колебаний корпуса автомобиля относительно подвески, которые возникают после поглощения упругим элементом (пружиной) удара от препятствия на дороге, за счет того, что как при сжатии, так и при отбое в амортизаторе осуществляется перекачка рабочей жидкости из верхнего резервуара амортизатора в нижний через тонкую форсунку соединительной муфты, чем и обеспечивается сопротивление движению жидкости. Это сопротивление зависит как от диаметра перепускного отверстия клапана, так и от вязкости жидкости, в качестве которой используют специальное машинное масло с заданными характеристиками. В разных фазах своих возможных движений амортизатор должен иметь разное сопротивление. Так, при сжатии сопротивление должно быть большое, чтобы корпус автомобиля не просел черезчур быстро и сильно. При отбое сопротивление должно быть меньше, чтобы подвеска успела быстро опуститься вниз и колеса автомобиля не

оторвались бы от дорожного полотна, что могло бы сделать автомобиль неуправляемым. Кроме того, в предельных положениях выдвижаемого штока как при сжатии, так и при отбое, жесткость подвески должна возрастать, чтобы исключить возможность «выхода амортизатора на упор» - ударов корпуса, который может возникнуть, если рабочий ход амортизатора выбран до упора. Эти свойства амортизатора определяются его рабочей характеристикой (рис. 3), описывающей силу сопротивления амортизатора в зависимости от величины скорости движения штока амортизатора.

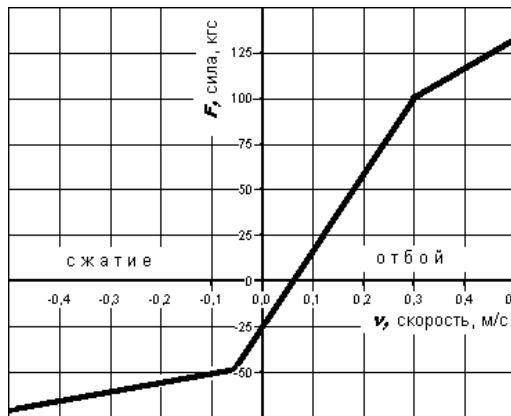


Рис. 3. Рабочая неизменяемая характеристика стандартного амортизатора легкового автомобиля, описывающая силу сопротивления амортизатора F при сжатии и при отбое в зависимости от скорости v движения штока амортизатора.

Рабочая характеристика обычного амортизатора рассчитывается при его проектировании, фиксируется и затем не меняется в процессе эксплуатации амортизатора, если не считать износа его деталей и жидкости. Расчет оптимальной характеристики опирается на средние характеристики проектируемого автомобиля и условий его эксплуатации, в том числе предполагаемого качества дорог.

Однако очевидно, что рабочую характеристику амортизатора хотелось бы оптимизировать не для временного окна, ширина которого T равна всему времени жизни автомобиля, а гораздо чаще – где T было бы равно времени одной конкретной поездки, или характерному времени изменения параметров автомобиля, или характерному времени изменения дорожных условий, или даже отдельной фазы

движения амортизатора. Последнее вполне реально, так как, например, амортизатор с MRF может изменять свои характеристики до 1000 раз в секунду.

Помимо этого, амортизатор с MRF имеет еще одну полезную особенность, он может одновременно играть и роль датчика [4].

Итак, для организации управления подвеской по методу ААУ можно использовать амортизатор с MRF, который будет служить одновременно актуатором и датчиком. Адаптивное управление можно использовать для оперативного изменения рабочей характеристики амортизатора, автоматически приспособливая (адаптируя) ее к текущим свойствам объекта управления (ОУ).

Соотнесем общую схему системы ААУ (рис. 4) с элементами рассматриваемой прикладной системы.

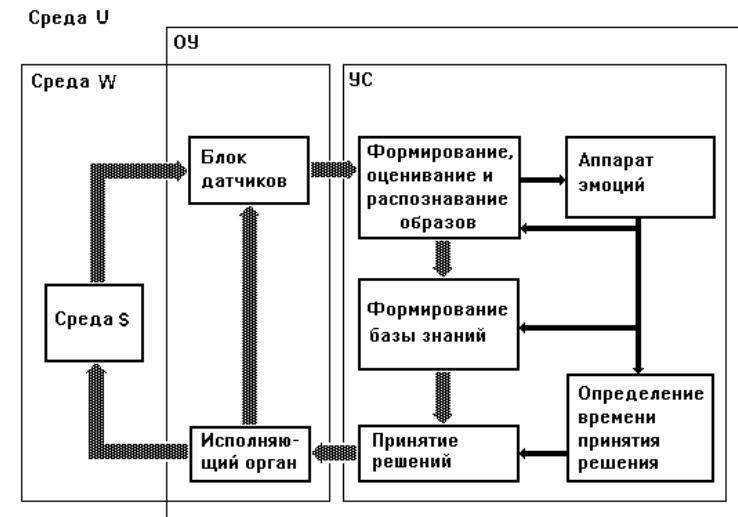


Рис. 4. Общая схема системы «автономного адаптивного управления» (ААУ).

Управляющая система (УС), установленная на борту автомобиля, взаимодействует с окружающей средой (на рис. 4 это «среда W») посредством блока датчиков (БД) и исполнительных органов (ИО) – актуаторов, которые для УС являются частью окружающей ее среды W. УС «не знает», что представляют собой датчики и исполнительные органы, она просто пользуется выходными сигналами БД и подает управляющие воздействия на ИО. С точки зрения управляющей системы не имеет значения, через какие объекты в среде W проходят сигналы и взаимодействия на пути

от ИО к БД, для УС «черным ящиком» является среда W, именно ею и должна управлять УС, устанавливая соответствие между воздействием на исполнительное устройство и получаемой реакцией в виде сигналов от датчиков. С точки же зрения внешнего наблюдателя можно видеть, что реакция «черного ящика» среды W складывается из реакций таких составляющих его элементов, как: актуатор (амортизатор с MRF с его системой привода – преобразователями, соленоидами и проч.), подвеска с ее упругими элементами и проч., автомобиль с его массой, упругими элементами корпуса, груза, сидений и т.д., дорожного полотна, с его препятствиями, воздушной среды, действующей на корпус автомобиля, водителя с его специфическим характером управления автомобилем, и других причин. Вот этот «черный ящик» среды W и является для УС объектом управления (ОУ). Очевидно, что математически формализовать точные свойства такого ОУ невозможно как по причине его большой сложности, так и по причине его постоянной и плохо предсказуемой изменчивости.

Итак, при желании можно говорить, что на рисунке 4:

- «исполняющий орган» это амортизатор с MRF и его необходимые приспособления,
- «блок датчиков» представлен этим же амортизатором с MRF и необходимыми электрическими приборами, дающими информацию о текущих значениях $f(t)$ и $df(t)/dt$,
- «среда S» это подвеска, автомобиль, дорога, воздушная среда, водитель, пассажиры, груз и т.д., а также бортовой компьютер и аппаратная часть системы управления,
- «управляющая система» это программа, реализованная на бортовом компьютере, сюда не входят датчики и актуаторы.

Управляющая система работает согласно принципам, соответствующим методу ААУ. Она состоит из двух основных контуров. Первый контур организует работу с «фактологической» информацией, устанавливающей соотношения между множествами входных и выходных сигналов УС. Второй контур организует работу с «качественной» информацией, придающей элементам «фактологической» информации оценки качества. Такие качественные оценки описывают степень соответствия тех или иных состояний ОУ ее целевым функциям.

«Фактологический» контур состоит из блоков «формирования и распознавания образов (ФРО)», базы знаний (БЗ), блока формирования БЗ и блока принятия решений. Контур «качественной» информации состоит из блока оценивания состояния ОУ, который мы называем также «аппаратом эмоций».

Контур «качественной» информации является определяющим, поскольку именно в нем формулируются целевые функции управления, которые определяют состав и содержание всех остальных блоков и функций системы. Напомним, что методология ААУ предполагает наличие некоторой иерархии целевых функций УС. Главными из них считаются две – выживание системы и накопление знаний. Целевая функция «накопление знаний» зашита в самой структуре УС, а также в ее алгоритме принятия

решений. Целевая функция «выживание» реализуется через систему качественных оценок образов, которые изначально заданы для УС данного объекта, или формируются УС автоматически. При принятии решений УС стремится перевести ОУ по возможности в состояния с лучшими из возможных оценок. Заказчик системы ААУ добивается того, чтобы УС выполняла полезную именно для него, заказчика, работу через систему априори задаваемых оценок изначально сформированных образов, а также формулируя правила для выработки оценок для образов, которые будут сформированы УС автоматически. В общем виде, для одной и той же системы разные заказчики могут установить разные оценки для одних и тех же образов и система будет принимать разные решения. Другими словами, УС ААУ это исполнитель, который находит и знает ответ на вопрос «как можно добиваться разных целей?», но какой именно цели нужно добиваться, что есть «хорошо», а что есть «плохо» - ей указывает заказчик.

Очевидно, что истинным заказчиком системы является руководство фирмы-производителя автомобилей, которое в свою очередь ориентируется на требования или капризы конечных заказчиков - покупателей автомобилей данной модели. Понятно, что у конечных заказчиков могут быть самые разные, в том числе и экзотические целевые функции. Нам в нашей прототипной разработке пришлось задать некие примерные требования, которые могли бы быть примером требований заказчика. В данном случае мы ограничились требованиями увеличить комфортность автомобиля за счет увеличения плавности его хода, а также увеличить устойчивость автомобиля в таких ситуациях, как поворот и наезд на препятствие одним колесом. В попытке количественно формализовать и сформулировать требования к комфортности, мы рассмотрели эргономические требования к подвеске автомобиля, учитывающие физиологические свойства человека в условиях вертикального движения с переменным ускорением. Такие требования сводятся к тому, чтобы спектр колебаний в вертикальной плоскости не содержал бы частот определенного диапазона, плохо переносимых организмом человека. При движении автомобиль колеблется в вертикальной плоскости с частотами в диапазоне от 0,5 Гц до 30 Гц. [5]. Неприятными для человека являются колебания с частотами в диапазоне от 0,5 Гц и до 12 Гц, поскольку в этом диапазоне лежат собственные частоты колебаний внутренних органов человека. Однако из физиологии известно, что наиболее вредными и даже опасными для человека являются колебания с частотами от 3 Гц до 8 Гц. Считается, что для обеспечения приемлемой плавности хода автомобиля подвеска должна обладать при статической нагрузке собственной частотой колебаний, близкой к частоте колебаний человека при ходьбе, равной 0,8 ... 1,2 Гц, и что наибольший комфорт обеспечивают подвески с собственной частотой, близкой к 1 Гц [6].

Анализируя временную кривую движения корпуса автомобиля, можно выделить методами цифровой фильтрации ту кривую движения, которая не содержит нежелательных вредных колебаний корпуса (3 Гц - 8 Гц), и считать ее текущей желаемой, «целевой» траекторией движения корпуса автомобиля, к которой и следует

стремиться с помощью управления УС. Соответственно, можно рассчитать текущее отклонение реального текущего положения корпуса от желаемого «целевого» положения. Эти функции выполняют блок датчиков и блок оценивания состояния ОУ.

Блок ФРО должен формировать и распознавать образы текущего состояния ОУ, которыми в данном случае могут быть образы значения и необходимых производных отклонения текущего положения корпуса автомобиля от вычисленного текущего «целевого» положения, которые соотносены с величиной отклонения положения выдвигаемого штока амортизатора от нейтрального значения, а также с текущей скоростью его движения. Этот блок в данном приложении может быть достаточно простым.

Блок «Выбор действия» своими выходами должен инициировать актуатор в соответствии с целевыми функциями управления. Выходы актуатора в данном случае будем интерпретировать как требуемые для данной ситуации значения жесткости амортизатора.

Блок «Выбор действия» своими выходами должен инициировать актуатор в соответствии с целевыми функциями управления. Выходы актуатора в данном случае будем интерпретировать как значения жесткости амортизатора для текущего положения. Выбор «действия» осуществляется УС на основе а) анализа текущего выхода блока ФРО, указывающего, какие образы распознаны в текущий момент, б) знаний, накопленных в «базе знаний», и в) качественных оценок образов, устанавливаемых «блоком эмоций». Способ принятия решений в системе ААУ ориентирован на достижение одновременно обеих целевых функций – выживания и накопления знаний. Эти цели в определенной степени противоречивы, поскольку поиск новых знаний требует совершения пробных случайных воздействий, а цель выживания требует совершения максимально надежных действий, приводящих ОУ в лучшие из возможных состояний.

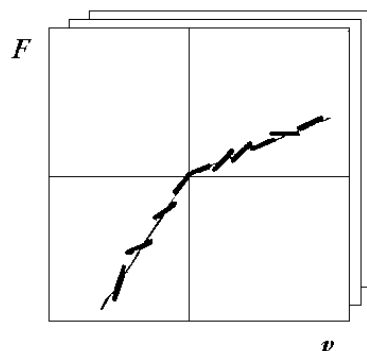


Рис. 5. Пример характеристической функции MRF-амортизатора с переменной вязкостью, эмпирически найденной УС ААУ для заданной модели автомобиля.

«База знаний» должна отображать эмпирически найденные УС статистически подтвержденные связи между образами текущего положения ОУ, действиями, которые может совершить УС, и результирующими образами – т.е., образами состояний, в которые переходит ОУ к следующему моменту времени, а также качественными оценками образов. Именно, «база знаний» указывает, какую вязкость надо придать MRF в той или иной из возможных ситуаций, представленных распознаваемыми образами. Полученная УС ААУ «база знаний» может быть представлена и интерпретирована как характеристическая функция амортизатора с переменной вязкостью (рис. 5). Функция здесь показана 3-мерной, поскольку она связывает вязкость, силу сопротивления и образы, описывающие движение штока амортизатора.

В результате проведенного моделирования процесса управления подвеской, снабженной управляемым системой ААУ амортизатором с MRF, было показано, что система ААУ успешно находит эмпирически такой вид характеристики амортизатора, который соответствует текущим свойствам автомобиля и среды. Пример такой характеристики показан на рисунке 5. Система AdCAS, автоматически строя такого рода базу знаний – характеристику амортизатора и одновременно используя ее для управления, повышает качество управления, в данном случае – плавность хода автомобиля. Так, на рисунке 6 показаны графики, отражающие качество управления с традиционной неуправляемой подвеской и с системой AdCAS, снабженной амортизатором с MRF.

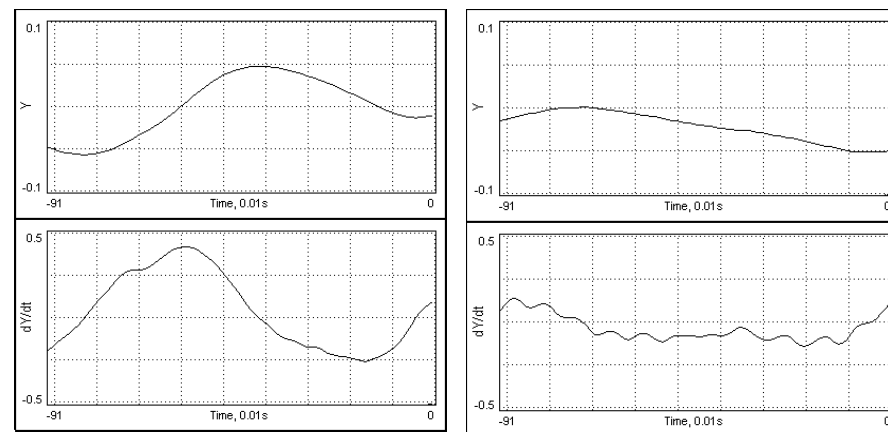


Рис. 6. Примеры движения корпуса автомобиля с неуправляемой подвеской (слева), и с адаптивно управляемой подвеской, снабженной амортизатором с MRF (справа).

Можно видеть, что этот вариант системы AdCAS, где в качестве актуатора используется амортизатор переменной вязкости, позволяет повысить плавность хода автомобиля. Этот эффект достигается за счет того, что система адаптивного управления

ААУ автоматически подстраивается к текущим свойствам данного автомобиля и среды, и изменяет свою «базу знаний». Понятно, что такой способ воздействия на движение автомобиля является скорее пассивным, чем активным, в том смысле, что такой актуатор не воздействует на автомобиль активно, а лишь пассивно изменяет свой коэффициент демпфирования. Этим и ограничиваются возможности такого варианта системы AdCAS. Перейдем теперь к рассмотрению более эффективного варианта системы AdCAS, снабженного действительно активным актуатором.

2.2. Вариант системы AdCAS с активной системой высокого давления

Рассмотрим вариант системы AdCAS, в котором в качестве актуатора используется другой известный нам вид активной подвески – амортизатор, в который под высоким давлением можно впрыскивать или откачивать из него масло. Такого рода актуатор, как было сказано выше, используется, например, в подвеске ABC автомобилей Mercedes Benz CL500.

Соотнесем элементы такой системы со схемой УС ААУ (рис. 4).

В этом варианте системы необходимы датчики, которые могут давать информацию о вертикальном положении корпуса автомобиля, его вертикальной скорости и ускорении. Наиболее доступным стандартным прибором такого рода являются акселерометры. В своем моделировании мы ориентировались на малогабаритные акселерометры, которые можно найти, например, в авиационной промышленности. Примерные характеристики такого акселерометра могут быть следующими:

- диапазон измеряемых ускорений: $\pm 15\text{ G}$;
- вес: $\sim 300\text{ g}$;
- размер: $45 \times 90\text{ mm}$;
- частота использования: 100 Hz .

Интегрируя показания акселерометра, можно получать количественные оценки вертикальной скорости $v(t)$ корпуса автомобиля в инерционной системе координат, а дважды интегрируя – количественную оценку вертикального положения $h(t)$ корпуса автомобиля. Используя цифровую фильтрацию временного ряда этих оценок с необходимой амплитудно-частотной характеристикой фильтра, устраняющего вредные для здоровья человека частоты колебаний, можно вычислять желаемое, или «целевое» положение корпуса автомобиля в каждый текущий момент времени, а также рассогласование реального и целевого положений корпуса. Одной из целевых функций управляющей системы AdCAS (обеспечивающей выживание ОУ) можно положить минимизацию этого текущего рассогласования. Можно также задать систему качественного оценивания величин рассогласования. Описанные здесь функции возложены на блок датчиков и блок «оценивания состояния ОУ» (рис. 4).

Блок ФРО должен формировать и распознавать образы текущего состояния ОУ, используя информацию об отклонении текущего вертикального положения корпуса

автомобиля от текущего целевого положения, а также о необходимых производных этой величины. В данной прикладной системе блок ФРО может быть не самообучаемым, так как алфавит образов (классов) и описания образов (классов), которые надо распознавать, можно положить заранее известными в наиболее простой реализации системы. Пусть алфавит классов представлен конечным числом упорядоченных образов. Идентификаторы образов снабдим возрастающими номерами.

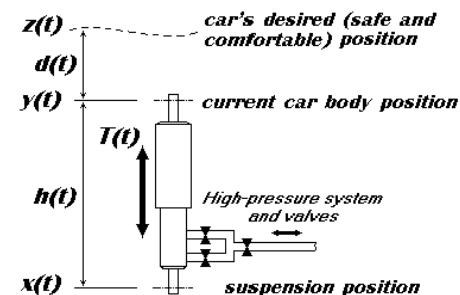


Рис. 7. Активный актуатор в системе AdCAS, представленный амортизатором, гидравлически соединенным с внешней системой, позволяющей создавать импульсы силы $T(t)$.

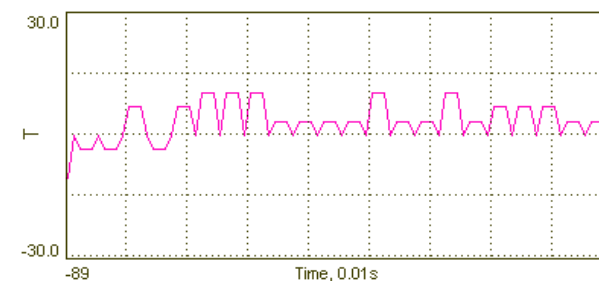


Рис. 8. Импульсные воздействия активного амортизатора на подвеску.

Исполняющий орган – актуатор в этом варианте системы AdCAS представлен амортизатором (рис. 7), в который на каждом такте Δt можно впрыскивать или откачивать рабочую жидкость, что создает активные воздействия на корпус автомобиля

в виде импульсов силы, направленных вдоль вертикального вектора и приложенных между подрессоренной и непрорессоренной массами подвески (рис. 8). Положим, что мы располагаем конечным числом вариантов воздействий актуатора, номера которых (идентификаторы) назовем здесь «действиями». Пусть упорядоченные номера действий соответствуют возрастающим по величине физическим воздействиям, возрастающим с постоянным шагом от максимального отрицательного до максимального положительного значения с нулевым значением в середине.

База знаний УС ААУ должна отражать автоматически найденные УС реально действующие в конкретной представленной прикладной системе переходы от «образов исходного состояния» посредством «действий» к «образам результирующего состояния», а последние должны иметь свои качественные оценки. Очевидно, что «образы результирующего состояния» не могут иметь такую же степень точности, определенности, как «образы исходного состояния». В соответствии с терминологией [7], предполагающей, что всякие сведения могут быть сравнимы на общность, «образы результирующего состояния» являются более общими сведениями, чем «образы исходного состояния». Соответственно, мы определили и ввели «образы результирующих состояний», в данном простом случае - априорно, а также априорно снабдили их качественными оценками. Однако связи между образами УС в системе AdCAS устанавливала автоматически на основании статистически проверенного своего эмпирического опыта взаимодействия с данным ОУ. Примеры БЗ в процессе накопления ею эмпирических «знаний», отражающих свойства данного автомобиля, представлены на рис. 9.

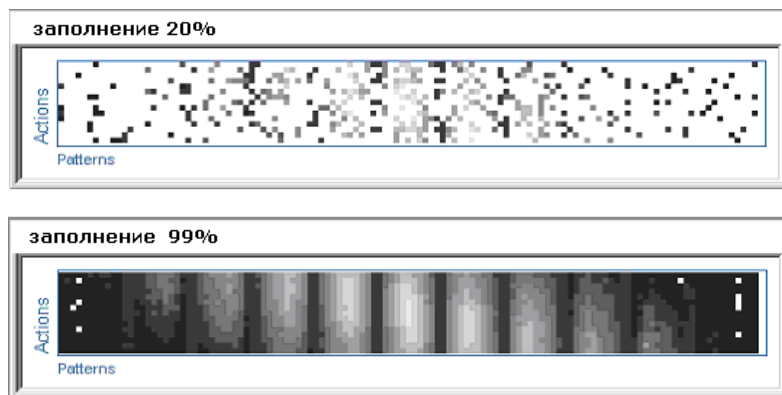


Рис. 9. Графическое представление «базы знаний» системы AdCAS, отражающей накопленные ею эмпирические «знания» о реакциях автомобиля на воздействия актуатора, в некоторые два момента ее жизни.

База знаний, накопленная УС, отражает свойства предъявленного объекта управления, а именно то, как этот ОУ реагирует на то или иное воздействие актуатора в том или ином различаемом УС случае, представленном распознанными образами. Как уже говорилось, реакции объекта управления зависят в данном случае от свойств автомобиля, подвески, дороги, и других объектов, влияющих на данный процесс. Если свойства одного из этих составляющих изменятся и закономерная реакция ОУ станет несколько иной, УС постепенно скорректирует свою БЗ.

Блок принятия решений в этом варианте системы AdCAS работает согласно общему алгоритму системы ААУ, а именно следующим способом. Блок ФРО к текущему моменту времени распознает определенные образы, описывающие текущее состояние ОУ. Блок принятия решений, во-первых, отделяет в БЗ те знания, которые имеют отношение к текущей ситуации. Во-вторых, решает, какой из целевых функций (выживание или накопление знаний) следует отдать предпочтение. В-третьих, принимает решение, соответствующее выбранной целевой функции.

Если предпочтение отдано целевой функции «накопление знаний» (обучение), то выбирается некоторое пробное воздействие в соответствии с заложенной в УС ААУ стратегией обучения. Это может быть полный равновероятный перебор пробных воздействий, или направленный поиск, управляемый заданием вероятностей выбора действия, использование градиентного спуска или поискового эволюционного метода на основе генетических алгоритмов. Здесь при выборе действия УС опирается не на заранее известный ей результат этого действия, но на некоторый прогноз этого результата, а сам результат еще неизвестен УС. УС как бы прошупывает, исследует те области в БЗ, для которых у нее еще нет знаний, и старается заполнить эти пробелы знаниями. На рисунке 9 этим пробелам в знаниях УС соответствуют пустые места в БЗ. При любой из таких стратегий обучения при выборе действия так или иначе используется некоторый случайный фактор, который позволяет прояснить для УС некоторую ранее неизвестную ей ситуацию. Понятно, что в этом режиме выбор действия должен иметь некоторую неопределенность.

Если же предпочтение отдано целевой функции «выживание», то действие следует выбирать с максимальной определенностью. Здесь УС опирается только на такие действия, результат которых уже известен - для них в БЗ уже записаны данные. Остается выбрать только лучшее из действий, именно - то действие, которое приведет ОУ к лучшему (максимальная качественная оценка) из возможных состояний. При этом выбор действия имеет максимальную определенность, а случайность в выборе действия минимальна.

Возможна также стратегия управления, когда исследование еще незаполненных областей БЗ и опора на уже известные данные осуществляются в одном алгоритме. Здесь выбор между режимами «выживание» и «накопление знаний» (управление или обучение) осуществляется не по команде сверху, а тактически, на основе анализа конкретной текущей ситуации. Решение о выборе действия принимается по

результатам анализа следующих факторов: каково текущее состояние ОУ; к каким результатам приводят уже известные по БЗ действия; в какой области БЗ лежат прогнозируемые максимумы качественных оценок, и т.п.

Нами были опробованы различные варианты стратегий принятия решений, и не только при работе с данным приложением метода ААУ, но и с другими прикладными системами. При общении с заказчиками выяснилось, что стратегия управления, в том числе стратегия управления режимами управления-обучения зависит от внешних обстоятельств. В некоторых случаях требуется минимизировать пробные случайные воздействия в режиме управления, но допускаются любые пробные воздействия в режиме обучения, в таких случаях эти режимы требуется разделить и переключать по команде извне. В некоторых случаях (например, как в системе управления угловым движением космического аппарата [8]) выбор режима зависит от качества текущего состояния ОУ, например, когда текущее состояние ОУ благоприятное и можно позволить УС совершить пробные воздействия с целью поиска новых знаний. В некоторых случаях ОУ может быть представлен «черным ящиком» с имеющимися протоколами прецедентов его функционирования, и пробные воздействия вообще нельзя совершать (это случай имел место при разработке системы поддержки принятия решений при управлении социальными объектами [9]). Здесь для обучения можно использовать имеющиеся протокольные данные. В некоторых случаях, в том числе в примере с подвеской автомобиля, пробные воздействия возможны, но их следует минимизировать – действительно, не следует встряхивать автомобиль специально с целью обучения УС, пассажирам это будет неприятно. В таких случаях можно использовать, например, заранее полученную тем или иным способом БЗ, а потом ее постепенно автоматически корректировать. Это будет сопряжено с минимальными пробными воздействиями на ОУ. Именно этот подход мы реализовали в системе AdCAS.

Перейдем теперь к обсуждению полученных нами результатов компьютерного моделирования.

3. Результаты компьютерного моделирования процесса управления активной подвеской автомобиля

3.1. Модель объекта управления – автомобиля и подвески

В качестве объекта управления (ОУ) для моделирования процесса адаптивного управления была разработана программная модель подвески одного колеса автомобиля. Мы отказались от модели автомобиля с 4-мя колесами, поскольку при таких предполагаемых параметрах управления (сравнительно слабые воздействия на подвеску, высокое быстродействие ~ 0.01 с) управление по каждому из колес можно полагать независимым. Кроме того, поскольку адаптивная система управления ААУ находит закономерности в реакциях объекта управления (в данном случае ¼ части

подвески), то в этих закономерностях частично отражаются и компоненты, обусловленные взаимными связями колес подвески. Поскольку используемая управляющая система является адаптивной и может автоматически приспосабливаться к объектам управления с широким диапазоном свойств, то мы тем самым можем не разрабатывать очень точной математической модели для демонстрации эффекта адаптивного управления.

Итак, движение ¼ части подвески (рис. 10) должно описывать зависимость поддрессоренной и неподдрессоренной масс подвески от возмущающей силы, роль которой играет профиль дорожного полотна.

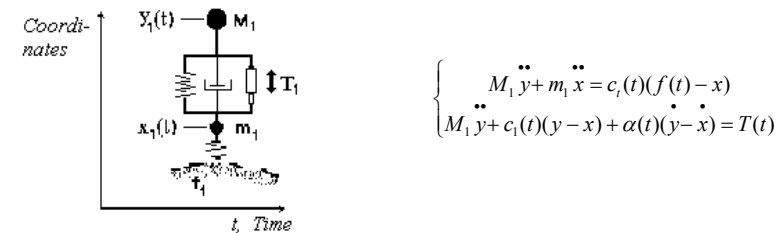


Рис. 10.

где $f(t)$ – профиль дороги,

$T(t)$ – управляющее воздействие со стороны актуатора,

$c_f(t)$ – упругость шины,

$c_1(t)$ – упругость пружины,

$\alpha(t)$ – коэффициент поглощения амортизатора,

$x(t)$ – координата подвески,

$y(t)$ – координата поддрессоренной массы (корпус автомобиля),

M – поддрессоренная масса,

m – неподдрессоренная масса.

Перепишем эту систему в следующей форме:

$$\begin{cases} \ddot{y} = \frac{1}{M_1} \left[T(t) - c_1(t)(y - x) - \alpha(t)(\dot{y} - \dot{x}) \right] \\ \ddot{x} = \frac{1}{m_1} \left[c_1(t)(y - x) + \alpha(t)(\dot{y} - \dot{x}) - T(t) + c_f(t)(f(t) - x) \right] \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{\Phi(t)}{M_1} \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{\Phi(t)}{m_1} + c(f(t) - x_3) \end{cases} \quad (6)$$

где $y = x_1$; $\dot{y} = x_2$; $x = x_3$; $\dot{x} = x_4$; $\Phi(t) = c_1(t)(y - x) + \alpha(t)(\dot{y} - \dot{x}) - T(t)$; $c = \frac{c_1}{m_1}$.

Система (6) решается методом Рунге-Кутты 4-го порядка (с точностью h^4) с заданными начальными условиями $f(t)$, $T(t)$. Величины $c_1(t)$, $\alpha(t)$, и $c_1(t)$ представлены константами.

Величины $x''(t)$, $y''(t)$, полученные в результате интегрирования дифференциального уравнения, используются в программе в качестве входных данных от сенсоров. Временные графики $x(t)$, $x'(t)$, $y(t)$, $y'(t)$ демонстрируют процесс движения корпуса автомобиля и подвески.

Состояния подвески и корпуса вычисляются с интервалом $\Delta_1 = 0.01$ сек (шаг интегрирования), с которым они и визуализируются на графиках.

Реальный временной интервал получения данных с сенсоров и цикл управления составляют Δ_2 , мы положили $\Delta_2=0.01$ сек, хотя в реальной системе этот интервал может быть и длиннее.

Рис. 11 показывает реакцию поддресоренной массы (корпуса автомобиля) на отдельный толчок со стороны препятствия на дороге (слева) и на отдельный управляющий импульс актуатора (справа). Можно видеть, как в ответ на толчок со стороны либо отдельного препятствия на дороге, либо одного импульсного воздействия активного элемента подвески корпус автомобиля начинает совершать нелинейные затухающие колебания.

Функция декремента затухания демпфирующего элемента (амортизатора) несимметрична и нелинейна -

(500 если $(dx-dy)/dt = v > 0$, и 1500 если $v < 0$).

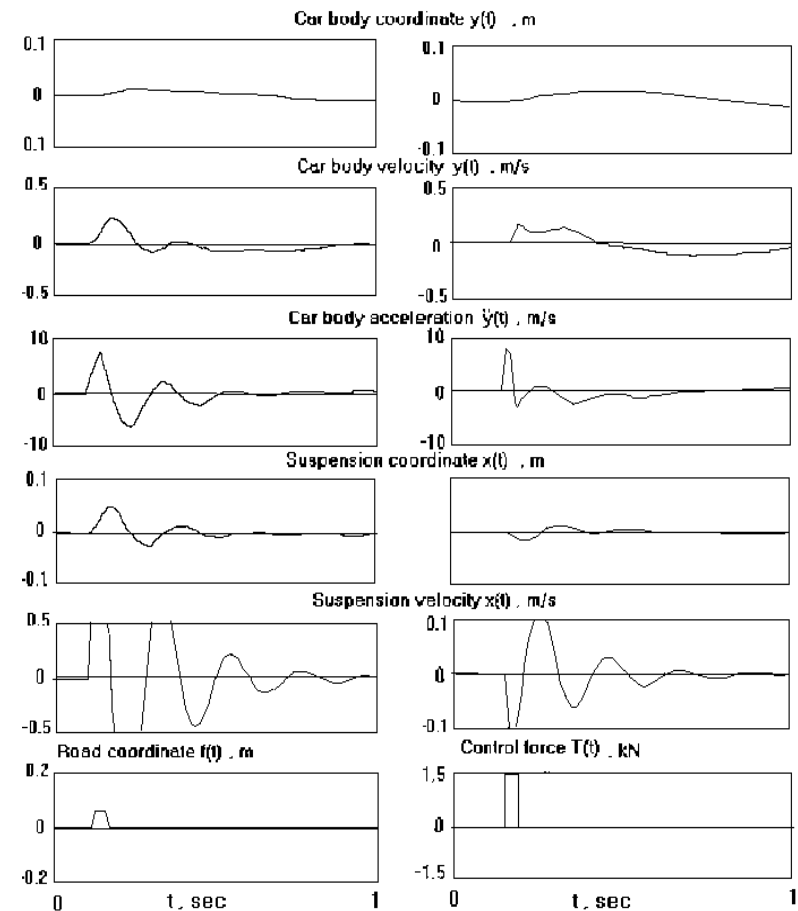


Рис. 11. Примеры реакции математической модели корпуса автомобиля и его подвески на воздействие единичного препятствия на дороге (слева) и на единичный толчок актуатора (справа). Здесь управление подвеской отсутствует.

Характеристика упругого элемента (пружины) нелинейна и имеет нерегулярные искажения (рис. 12).

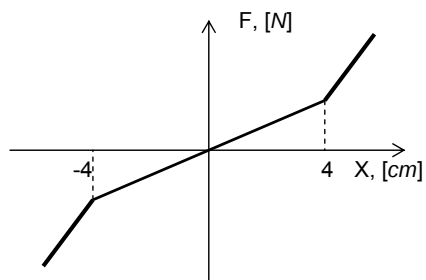


Рис. 12. Характеристика упругого элемента (пружины) в модели подвески.
Здесь F – сила пружины, X – удлинение пружины.

При желании эту модель можно было бы усложнить во многих аспектах. Например, можно учесть функцию наката колеса, которая существенна при скоростях движения меньших 40 км/час. Можно учесть зависимость между передней и задней осями подвески (рис. 13) или между всеми 4-мя колесами (рис. 14).

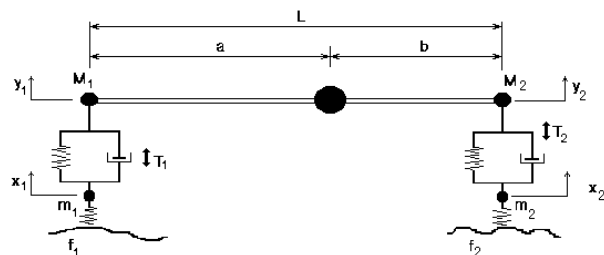


Рис. 13. Пример 2-осной модели подвески.

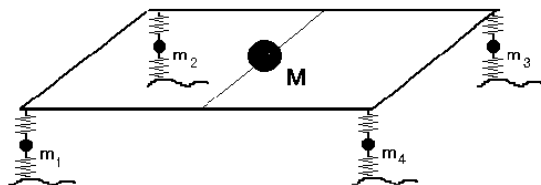


Рис. 14. Пример 4-осной модели подвески.

Однако мы не использовали таких усложненных моделей, полагаясь на способность управляющей системы ААУ адаптироваться к изменениям свойств объекта управления в широких пределах.

3.2 Модель среды - профиля дороги

Согласно методологии ААУ, система управления должна адаптироваться не только к свойствам объекта, в нашем случае - к свойствам автомобиля с его подвеской, но и к свойствам среды, в которую помещен объект, здесь – профили дорожного покрытия. В программе профиль дороги представлен тремя вариантами (рис. 15):

- гладкая дорога с единичным препятствием заданной высоты и длины;
- гладкая дорога с периодически следующими стандартными единичными препятствиями заданной высоты и длины;
- дорога с реалистичным профилем, который моделировался как случайный временной процесс с определенными характеристиками, соответствующими классификации МАДИ и ISO, предусматривающей наличие трех компонент микропрофиля: непрерывной (гауссовской), дискретной (пуассоновской) и периодической компоненты [5].

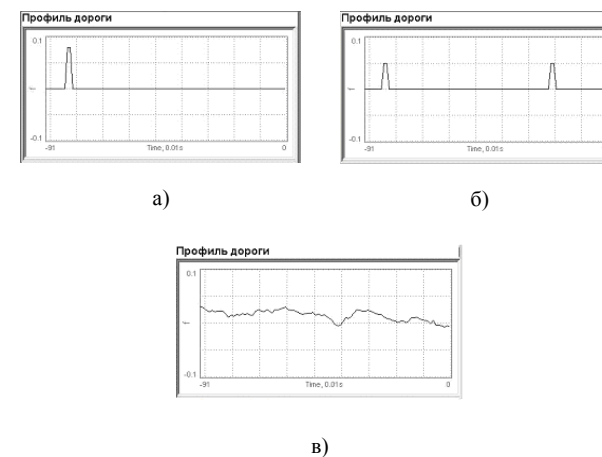


Рис. 15. Модели среды – профили дорожного покрытия: а) единичное препятствие, б) периодические препятствия, в) реалистичский профиль.

3.3. Результаты моделирования движения автомобиля

Теперь покажем, как ведет себя автомобиль и его подвеска (представленные данной моделью) при движении по дороге под управлением системы AdCAS.

Рисунок 16 показывает ситуацию с наездом на отдельное препятствие автомобиля с неуправляемой подвеской (слева) и с системой AdCAS (справа).

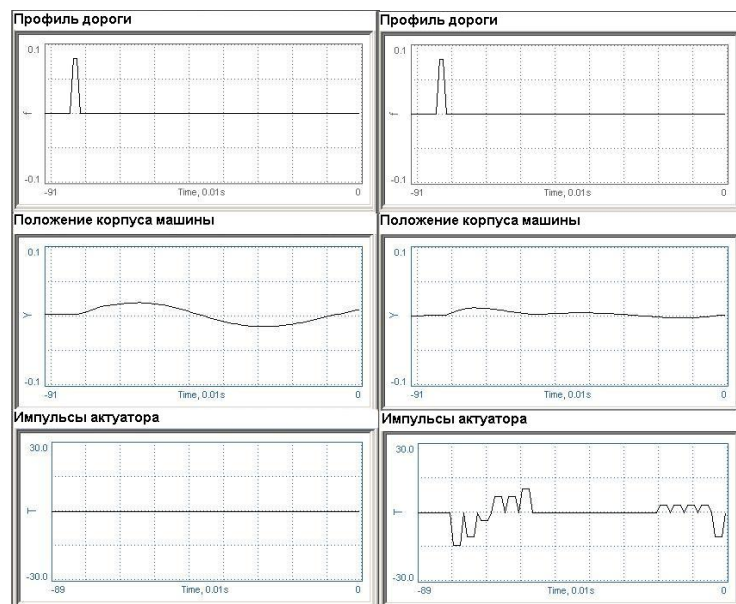


Рис. 16. Изменение положения корпуса машины при проезде над одиночным препятствием. Слева – подвеска без управления, справа – подвеска, управляемая системой AdCAS.

Можно видеть, что корпус автомобиля с неуправляемой подвеской после наезда на препятствие подскакивает вверх на сравнительно большую высоту и затем начинает совершать многочисленные медленно затухающие по амплитуде колебания. В случае с работающей системой AdCAS, сразу же после распознавания отклонения реальной траектории движения корпуса автомобиля от желаемой траектории, управляющая система принимает решение о необходимости совершения актуатором корректирующего управляющего импульса, и с помощью накопленной базы знаний определяет направление и величину необходимых импульсов, посылая соответствующие команды актуатору. С помощью в данном случае - 6-ти импульсных воздействий система AdCAS гасит основной скачок корпуса автомобиля, который, как можно видеть, имеет в 2 раза меньшую амплитуду, чем при неуправляемом движении. Затем с помощью еще нескольких точных импульсов система AdCAS подавляет

наведенные колебания корпуса, так, что колебательные движения корпуса автомобиля практически уже не заметны. Весь «фокус» состоит в точности подбора величины управляющих импульсов, которые аналитически рассчитать было бы чрезвычайно трудно, система же AdCAS пользуется эмпирически найденными ею знаниями о текущих свойствах именно данного автомобиля.

На рисунке 17 показано, как автомобиль преодолевает периодически расположенные препятствия. Можно видеть, что с возмущением от очередного препятствия система AdCAS справляется с помощью нескольких (2-6) импульсов. Движение корпуса автомобиля с работающей системой AdCAS (справа) существенно более плавно, чем при неуправляемой подвеске (слева).

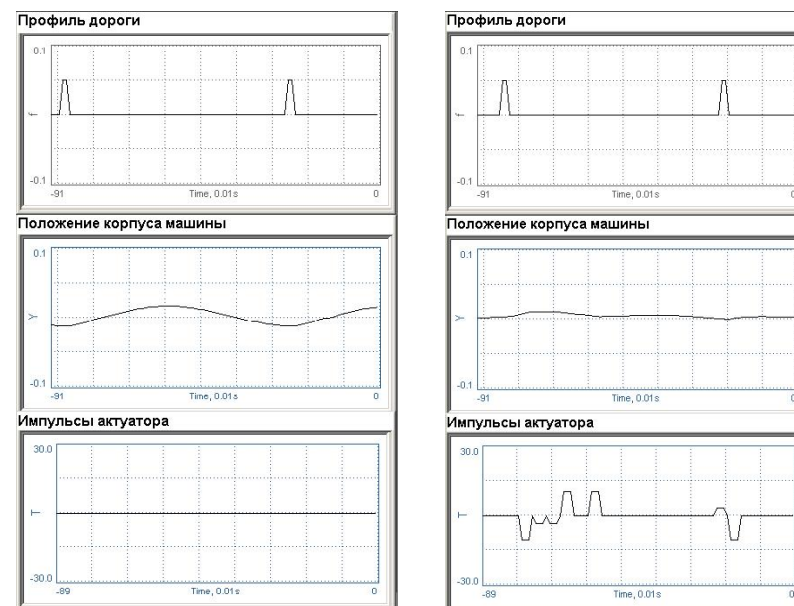


Рис. 17. Движение автомобиля по дороге с периодическими препятствиями. Слева – подвеска без управления, справа – система AdCAS включена.

Рисунок 18 иллюстрирует эффект управления при движении по неровной поверхности дороги. Слева показано движение автомобиля с неуправляемой подвеской, справа – с системой AdCAS. На левом рисунке можно видеть, что корпус автомобиля с неуправляемой подвеской постоянно совершает колебания со сравнительно большой амплитудой. На правом рисунке видно, что система AdCAS своими точно

подобранными управляющими импульсами добивается того, что амплитуды колебаний корпуса автомобиля становятся существенно меньшими. Понятно, что они не могут быть равными нулю, потому, что автомобиль – не самолет, и не может двигаться по горизонтальной прямой, но при данном профиле дороги можно вычислить желаемую траекторию движения с учетом тех критериев и целей, которые удастся формализовать. Однако, даже если известна такая желаемая траектория, совсем другая задача – заставить автомобиль придерживаться этой траектории, пользуясь имеющимися актуаторами. Нельзя «зацепиться» автомобилем за эту траекторию, как за направляющий рельс. Однако последняя задача и является главной особенностью системы AdCAS – она «знает», как заставить автомобиль придерживаться указанной траектории при помощи имеющихся актуаторов.

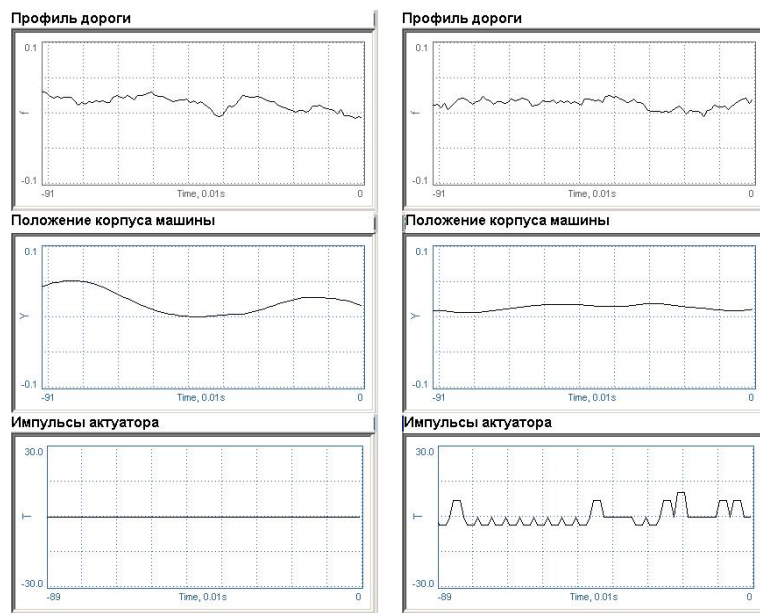


Рис. 18. Движение автомобиля по неровной реалистической дороге. Слева – подвеска без управления, справа – система AdCAS включена.

3.4. Оценивание качества работы системы управления подвеской

Представленные выше графики дают возможность оценить эффект применения адаптивной системы управления AdCAS «на глаз». Можно видеть, что движение

корпуса автомобиля с управляемой подвеской становится более гладкой. Хотелось бы однако иметь количественные критерии для оценивания этого эффекта. Такие критерии позволили бы оценивать «качество управления», производимого системой AdCAS. Они полезны для отладки системы, для сравнения различных ее вариантов и т.п. процедур.

Качество управления можно оценивать количественно с помощью нескольких критериев. Например, с помощью графика временного хода отклонения реального положения корпуса от идеального, «целевого» положения (рис. 19). Такой график позволяет говорить об амплитудах отклонения в те или иные моменты времени. Однако это скорее «дифференциальный» критерий, чем «интегральный» и не очень удобен для оценивания качества управления в общем.

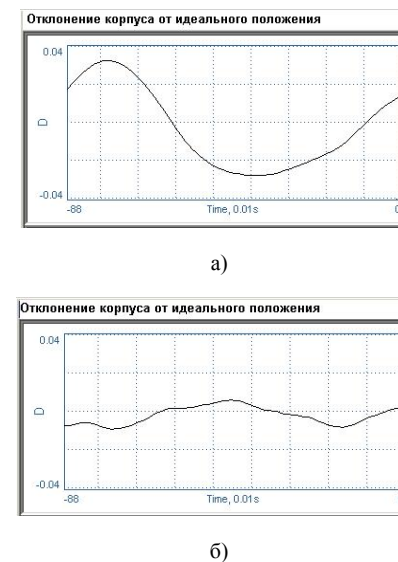
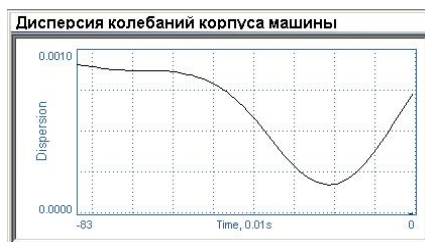


Рис. 19. Отклонение положения корпуса машины от идеального положения а) при неуправляемой подвеске; б) с управляемой подвеской.

Если зафиксировать траекторию движения корпуса автомобиля (либо величины отклонения реальной и желаемой траекторий) в течение M тактов времени в виде временной кривой $x(t)$, то гладкость движения корпуса автомобиля можно количественно оценить, рассчитав величину дисперсии D кривой $x(t)$ на этом временном окне. Чем более гладкой является кривая $x(t)$, тем меньшее значение будет иметь дисперсия. Хотя обратное утверждение в общем случае не является

верным, тем не менее, дисперсию можно с этой оговоркой использовать для оценивания гладкости кривой. Если сдвигать временное окно фиксированной ширины M вслед за текущим моментом времени t , рассчитывая дисперсию D , и фиксируя ее на графике $D(t)$, то можно рассматривать $D(t)$ как количественную оценку качества управления: именно – чем меньше $D(t)$, тем выше качество управления (рис. 20). Текущая дисперсия является уже «интегральной» оценкой, она позволяет сравнивать качество управления на различных временных интервалах. Так, по рисунку 20 видно, что текущая дисперсия при обычной неуправляемой подвеске может достигать значений, в несколько (2-4) раз больших, чем при подвеске, управляемой системой AdCAS.



а)



б)

Рис. 20. Количественное оценивание качества управления с помощью «текущей» дисперсии колебаний корпуса машины: а) подвеска без управления, б) управляемая подвеска.

Большую информацию как для инженеров, так и для физиологов может дать частотный анализ колебаний корпуса автомобиля в процессе его движения, например – спектр мощности колебаний корпуса. Например, физиологи выражают свои рекомендации или требования к характеру вертикального движения автомобиля именно в терминах

спектров мощности – оговаривая допустимые или вредные частоты и амплитуды колебаний.

Зафиксировав кривую движения вертикальной координаты корпуса автомобиля на некотором временном окне, можно рассчитать спектр мощности этого временного процесса. На рисунке 21 представлены спектры мощности $G_f(f)$ и $G_c(f)$ колебаний корпуса автомобиля с неуправляемой и управляемой подвеской соответственно. Можно видеть, что при неуправляемой подвеске, корпус автомобиля имеет гораздо более выраженные колебания в диапазоне частот от примерно 0.5 Гц до 1.8 Гц по сравнению с управляемой подвеской.

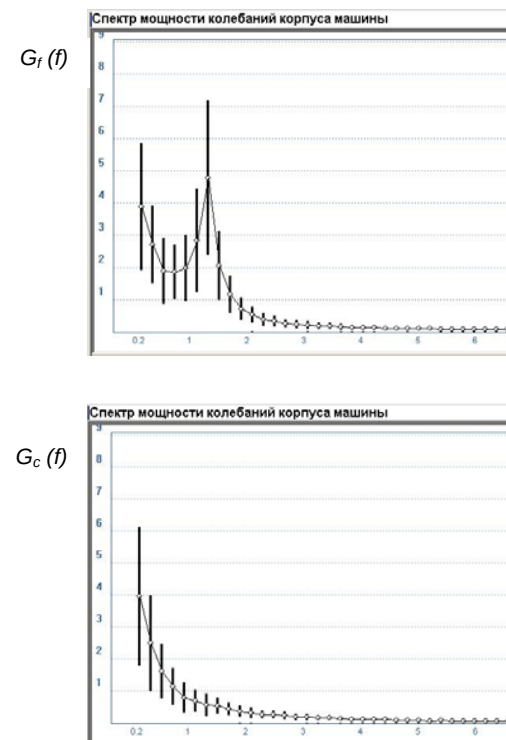


Рис. 21. Спектры мощности колебаний корпуса машины: $G_f(f)$ - подвеска без управления, $G_c(f)$ - подвеска с управлением.

Для того, чтобы сказать, во сколько раз система AdCAS подавляет колебания на тех или иных частотах спектра, надо найти отношение амплитуд каждой пары частотных составляющих обоих спектров. Результат будет представлять собой своего рода амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) системы AdCAS, как системы, подавляющей колебания определенных частот, т.е., как фильтра (рис. 22). По рисунку 22 можно видеть, что система AdCAS более чем в 2 раза подавляет частоты от 1 Гц до 1.8 Гц, при этом частоты 1.2 Гц подавляются в 8 раз. На графике можно заметить также небольшое (до 1.3 раз) усиление колебаний на частотах больших 3.5 Гц. Мы не исследовали этот вопрос специально, однако можно предположить, что эти значения находятся в пределах точности измерений, но могут быть связаны и с вибрацией, создаваемой актуатором. В последнем случае можно искать пути уменьшения этого эффекта, например, за счет оптимизации профиля импульсов силы, развиваемых актуатором. Кроме того, известно, что колебания корпуса автомобиля с частотами выше 2.5 Гц обычно весьма слабы, поскольку они всегда хорошо подавляются пружинами подвески, поэтому мы можем не рассматривать колебаний в этом диапазоне частот.

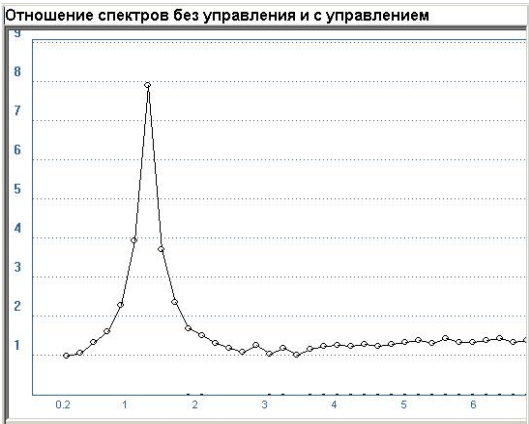


Рис. 22. «Амплитудно-частотная характеристика» системы AdCAS, как фильтра, подавляющего частоты колебаний корпуса автомобиля. Ось абсцисс соответствует частотам от 0.2 Гц до 6.8 Гц. По оси ординат показаны отношения мощностей амплитуд $G_f(f)/G_c(f)$ спектров колебаний неуправляемой и управляемой подвесок.

3.5. Границы применимости системы AdCAS при изменении параметров автомобиля

Система AdCAS является адаптивной системой управления, где под адаптивностью мы понимаем способность системы приспосабливаться к изменяющимся свойствам объекта управления непосредственно в процессе управления. Для демонстрации адаптивных способностей системы AdCAS мы провели серию компьютерных испытаний процесса управления с расчетом АЧХ, в процессе которых принятые нами за стандартные значения основных параметров модели автомобиля и подвески изменялись в пределах, указанных в Таблице 1. При изменении одного параметра, остальные имели стандартное значение.

№№ кривых на графиках	1	2	3	4	5
Изменение параметра	30%	65%	100%	135%	350%
M – поддрессоренная масса (1/4 массы корпуса автомобиля), кг	90	190	290	390	1000
m – неподрессоренная масса, кг	18	38	59	80	200
C_t – упругость шины	504	1092	1681.2	2269	5884
$C_1(1)$ – коэффициент упругости пружины	5700	12350	19000	25650	66500
$C_1(2)$ – коэффициент упругости пружины	11400	24700	38000	51300	133000
a – коэффициент поглощения	300	650	1000	1350	3500

Таблица 1. Допустимые для адаптации системы AdCAS изменения параметров автомобиля.

На рисунках 23 и 24 в качестве примеров показано, как изменяется АЧХ системы AdCAS при изменении двух параметров – массы корпуса автомобиля (рис. 23) и упругости шины (рис. 24), соответственно Табл. 1. Можно видеть, что во всех указанных в Табл. 1 случаях система AdCAS автоматически адаптируется к свойствам предъявленного ей автомобиля, и управляет его подвеской так, что поставленная целевая функция – увеличить плавность хода, эффективно достигается.

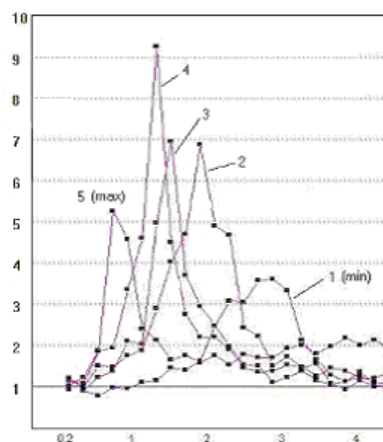


Рис. 23. АЧХ при изменении массы корпуса автомобиля M .

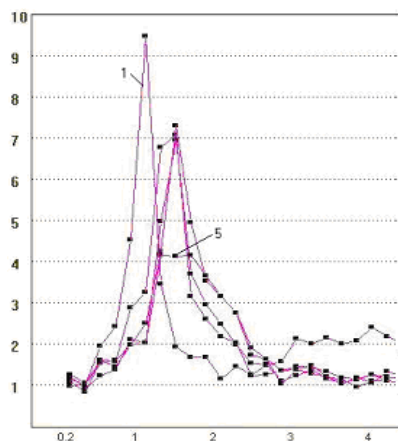


Рис. 24. АЧХ при изменении упругости шины C_r .

Таким образом, мы показали, что система AdCAS способна эффективно подавлять вибрации корпуса автомобиля в диапазоне частот от 0.5 Гц до 2.5 Гц, особенно вредном для здоровья человека, что повышает плавность хода автомобиля, следовательно - его комфортность. Очевидно, что повышение плавности хода важно не только для легковых автомобилей общего назначения, но и для специального автотранспорта, например, карет скорой помощи, автомобилей для перевозки хрупких или взрывоопасных грузов и т.п.

Показаны также адаптивные свойства системы AdCAS, состоящие в том, что система автоматически перенастраивается при изменении свойств автомобиля и подвески, при этом изменяться могут различные параметры и в широких пределах. Это возможно потому, что система AdCAS управляет не с помощью математической модели автомобиля, но за счет эмпирических знаний, полученных по прецедентам, и состоящих в поиске отображений между множествами входных и выходных параметров объекта управления (подвеска плюс автомобиль плюс среда). Эффект достигается не просто за счет робастности системы, но за счет именно автоматического переучивания (адаптации) базы знаний системы AdCAS.

4. Возможности использования системы AdCAS для повышения устойчивости и управляемости автомобиля

Еще раз обратим внимание на следующее обстоятельство. Основная роль управляющей системы AdCAS состоит в том, что она выясняет, как именно предъявленный ей объект управления в тех или иных различных УС своих состояниях реагирует на управляющие воздействия актуаторов. В этом состоят основные «знания», накапливаемые в базе знаний УС. Эти знания можно использовать для того, чтобы управлять объектом в соответствии с любыми целями. «Целевое» состояние, в которое кому-либо хочется перевести объект управления, может быть вписано в присущие системе ААУ целевые функции выживания и накопления знаний. В этом смысле автономная система ААУ вполне допускает участие внешнего «постановщика целей».

Например, в системе AdCAS управляющая система знает, как можно манипулировать автомобилем с помощью актуатора, как его можно перевести в любое из возможных состояний. Однако само это «целевое» состояние управляющей системе надо указать. Выше мы показали, что некоторые полезные целевые состояния можно формализовать и вычислять, например – траекторию движения корпуса автомобиля «желаемую», или идеальную с точки зрения физиологии человека – траекторию, не содержащую колебаний с вредными для здоровья человека частотами. Эта целевая траектория вычисляется специальным блоком программы и указывается управляющей системе, которая и подталкивает корпус автомобиля к этой траектории. Очевидно, что управляющей системе можно указать любую (с учетом определенных ограничений) траекторию и УС будет стремиться к ее достижению. Например, целевую траекторию может указывать человек или вычислять какая-то специальная программа, можно также выбирать такую целевую траекторию из некоторого их множества, хранящегося в некоторой «памяти траекторий». Предположим, мы говорим УС: «подними правый борт машины на 5 см и держи в течение минуты» - управляющая система выполнит это требование. Или приказываем: «пусть траектория вертикального движения корпуса имеет пилообразную форму» и т.п. Видимо, можно предложить определенные траектории, полезные в каких-либо отношениях, например, для

повышения устойчивости или управляемости автомобиля в некоторых типичных ситуациях. Мы для примера предложили две такого рода траектории, полезных для повышении устойчивости автомобиля. Рассмотрим эти режимы.

4.1. Использование системы AdCAS для повышения устойчивости и управляемости автомобиля на повороте

Известно, что при прохождении поворота дороги корпус автомобиля наклоняется в сторону от центра дуги поворота, что приводит к разгрузке колес, идущих по внутренней стороне поворота. Наклон корпуса связан с растяжением пружин подвески с внутренней стороны и их сжатием с внешней стороны поворота. Разгрузка колес будет тем большей, чем больше скорость движения автомобиля и чем меньше радиус поворота. Разгрузка колеса приводит к ослаблению его сцепления с дорожным полотном, разная загрузка правых и левых колес приводит к разнице сцепления с грунтом правых и левых колес, что ослабляет или может лишить автомобиль управляемости и привести к заносу. При больших скоростях и/или малом радиусе поворота возможен даже отрыв колес и опрокидывание автомобиля. Наклон автомобиля на поворотах неприятен для пассажиров и может вызвать опрокидывание груза, который перевозит автомобиль (автор однажды счастливо избежал столкновения с крупногабаритным грузом, упавшим с кузова наклонившегося на повороте грузовика).

Конструкторы автомобильных подвесок предлагают различные их конструкции, препятствующие наклону автомобиля (рис. 25): механические, гидравлические и т.п. Такие дополнительные технические конструкции утяжеляют и удорожают автомобиль.



Рис. 25. Пример механической подвески DAS, препятствующей наклону корпуса автомобиля на повороте. На открытой передней части автомобиля видны дополнительные устройства и пружины подвески. Сзади для сравнения с наклоном движется автомобиль без такой системы (фотография взята из Интернета).

Нам представляется, что систему AdCAS сравнительно легко использовать для предотвращения эффекта наклона корпуса автомобиля при поворотах. Для этого

следует просто указать нужную для каждого угла корпуса автомобиля траекторию его движения. Например, при повороте передних колес можно дать УС команду поддерживать высоту корпуса автомобиля ровно на том уровне, который она имела при входе в поворот, т.е., не допускать провисания корпуса с внешней стороны поворота и подъема корпуса с внутренней стороны (рис.26).

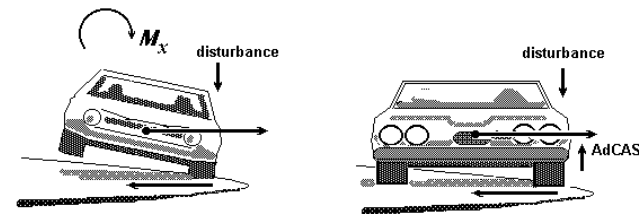


Рис. 26. На повороте система AdCAS может подталкивать корпус автомобиля, поддерживая его на постоянном уровне.

Сравним, как ведет себя модель автомобиля без управляемой подвески (рис. 27) и с управляемой подвеской (рис. 28).

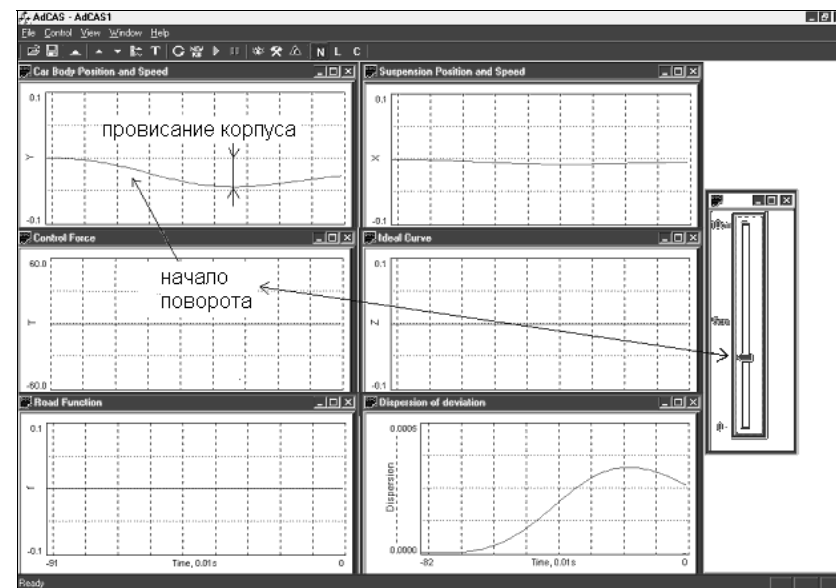


Рис. 27. Неуправляемая подвеска автомобиля допускает провисание корпуса автомобиля под действием центробежной силы при прохождении поворота.

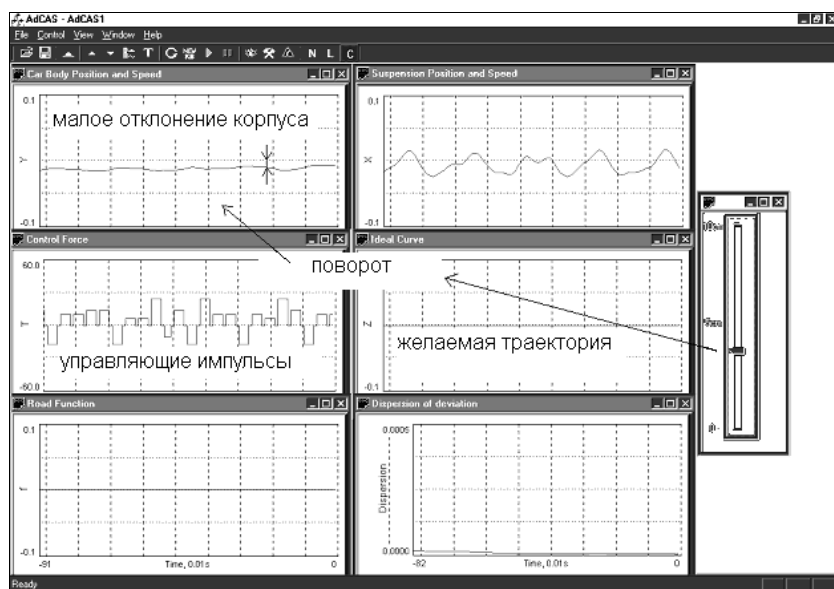


Рис. 28. Управляемая системой AdCAS подвеска автомобиля не допускает провисания корпуса автомобиля при повороте посредством точных импульсов актуатора.

Как видно по результатам моделирования, та же самая система AdCAS, которая повышает плавность хода автомобиля, способна решать совершенно иную задачу – повышать устойчивость автомобиля на поворотах, и при этом не требуется никакого дополнительного технического оборудования.

4.2. Использование системы AdCAS для повышения устойчивости и управляемости автомобиля при преодолении крупных препятствий

Вторая полезная траектория, которую мы можем предложить, касается ситуации, возникающей при наезде автомобиля одним колесом на крупное препятствие (рис. 29).

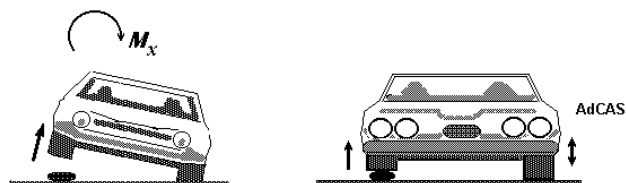


Рис. 29. Система AdCAS может бороться с опрокидывающей силой, возникающей при наезде автомобиля одним колесом на препятствие.

В этой ситуации возникает опасная опрокидывающая сила. Если вовремя распознать эту ситуацию, то можно с помощью системы AdCAS заставить противоположную сторону корпуса автомобиля двигаться по траектории, в которую введена компонента, например, треугольного или колоколообразного вида (рис. 30, 31).

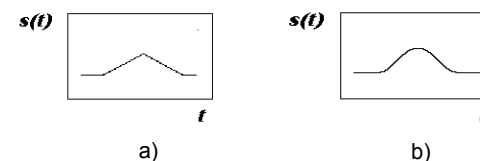


Рис. 30. Примеры возможных стандартных корректирующих траекторий вертикального перемещения автомобиля, увеличивающие устойчивость при наезде на препятствие.

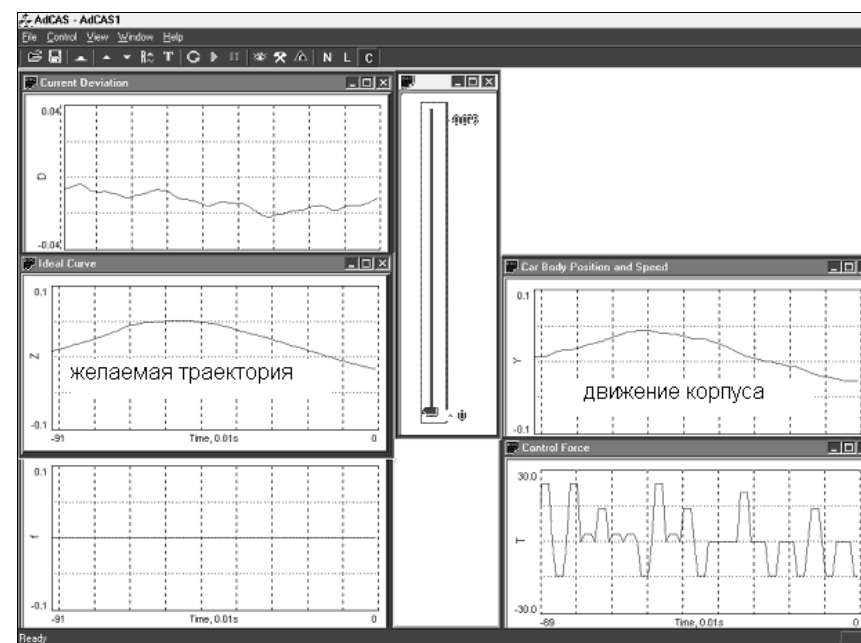


Рис. 31. Результат корректирующего управления при наезде на препятствие. При наезде на крупное препятствие система AdCAS приподнимает противоположный край автомобиля, устраняя опрокидывающий момент.

Можно предложить и другие корректирующие траектории, например, для разгона автомобиля (исключить заваливание назад) и торможения (исключить клевков корпуса).

Таким образом, мы показали, что система AdCAS, построенная на основе метода ААУ, действительно является адаптивной, многоцелевой и многокритериальной системой управления.

4.3. О потреблении энергии системой AdCAS

Рассмотренный выше вариант системы AdCAS с активным актуатором высокого давления очевидно требует больших затрат энергии, чем вариант системы AdCAS, использующий пассивный амортизатор с жидкостью MRF переменной вязкости.

По нашим оценкам, работа системы AdCAS с актуатором высокого давления, работающем в рассмотренном режиме повышения плавности хода за счет активного подавления ненужных отклонений корпуса в вертикальной плоскости, в том виде, как это было смоделировано (без какой-либо оптимизации системы по энергетическим затратам) с учетом КПД 20% и для всех 4-х колес потребует приблизительно 2 kW, т.е. около 3 л.с. Это плата за повышенную комфортность автомобиля. Естественно, что эта величина является только первой оценкой, и существенно зависит от конкретных характеристик актуатора. По нашей информации полученная величина близка к характеристике активной подвески ABC, устанавливаемой на Mercedes-Benz CL 500.

5. Краткий обзор рынка

Активные подвески являются сегодня одним из важнейших направлений развития автомобильной отрасли. Большинство ведущих автомобилестроительных фирм ведут интенсивные исследования в этой области. В этом сегменте рынка заявляют о себе:

Lotus Cars Ltd.	Cadillac	Renault
McLaren	Ferrari	Citroen
Williams	Ford	Volvo
Mercedes Benz	Lincoln	Mitsubishi
Lotus	Opel Omega	Toyota
General Motors	Audi	Nissan

Наиболее продвинутыми моделями автомобилей с активными подвесками на сегодня являются, по-видимому:

- Mercedes Benz CL500 и CL600 (2001 г.) с активными подвесками “Active Body Control” (ABC), оснащенными акселерометрами, микропроцессором и активными гидравлическими актуаторами высокого давления, и

- Cadillac STS (de luxe седан) и Cadillac Escalade (2002 г.) фирмы Cadillac & General Motors, оснащенные активными подвесками “MagneRide” и “StabiliTrak”, построенными на основе амортизаторов с переменной вязкостью (используется MRF), управляемыми микропроцессорами,

Тренд рынка состоит в том, что если в 80-е годы активные подвески использовались только в гоночных автомобилях Формулы 1, в 90-е годы – в дорожных внедорожниках и SUV, в 2000 году – в дорожных легковых автомобилях, то в текущее время о внедрении активных подвесок говорят практически все разработчики легковых автомобилей среднего класса. Особое внимание к активным подвескам проявляют разработчики специального автотранспорта – реанимационных автомобилей скорой помощи, машин для перевозки специальных грузов.

В последние годы активные подвески начинают использовать в железнодорожном транспорте. В последнем случае речь идет пока о подвесках, способных изменять наклон поезда, например, при прохождении поворотов, что увеличивает устойчивость поезда и комфорт для пассажиров. Такого рода подвесками оснащены скоростные пассажирские поезда tilting trains, которые могут наклоняться на поворотах на требуемый угол. Наклон зависит от скорости движения поезда и радиуса поворота. Примерами tilting trains являются такие скоростные поезда, как шведский X-2000 и итальянский Pendolino. Если говорить только о подвесках, где управление достигается не за счет чудес механики и гидравлики, а за счет управляющих систем, реализуемых бортовыми вычислительными устройствами, то можно дать следующую сравнительную таблицу:

	Алгоритмы управления на основе математических моделей движения автомобиля	Алгоритмы управления на основе систем, основанных на знаниях, нечеткой логики, нейросетей и т.п.
Достоинства	Большой опыт использования. Детерминированность.	Адаптивность к текущим свойствам автомобиля. Не требуется разработка математической модели автомобиля.
Недостатки	Чрезмерная сложность математической модели, малая адекватность модели реальному автомобилю.	Недостатки, присущие поисковому характеру поведения при обучении.

Общая тенденция развития систем управления для подвесок состоит в постепенном переходе от механико-гидравлических систем с их повышенным весом, к системам управления на основе математических моделей с их чрезмерной усложненностью и детерминизмом, и далее – к системам на основе «искусственного интеллекта» с их эмпирическими знаниями и способностью к переобучению.

6. Заключение

Настоящая работа является прежде всего очередным подтверждением того, что метод ААУ можно применять для управления разными объектами, сохраняя общие принципы построения системы ААУ, схему управляющей системы и способы ее реализации. При построении прикладных систем можно использовать различные датчики и актуаторы. В данном случае это было показано на примерах использования различных типов датчиков и актуаторов.

В качестве системы адаптивного управления подвеской автомобиля система AdCAS продемонстрировала адаптивные свойства, высокое качество управления в обученном состоянии при сравнительной простоте реализации системы управления. Важно также то, что система AdCAS допускает использование разных целей управления и разных критериев оценки качества состояния автомобиля и качества управления. Это в работе было продемонстрировано на примерах применения системы AdCAS для разных целей – для повышения комфортности автомобиля, для повышения его устойчивости и управляемости.

Очевидно также, что описанную здесь систему управления можно применять для управления подвесками не только автомобилей, но и других транспортных и не только транспортных средств.

Список литературы:

- [1] Жданов А.А., Метод автономного адаптивного управления // Известия Академии Наук. Теория и системы управления, 1999, № 5, с. 127-134
- [2] Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. М.:Наука, 1979.
- [3] "За рулем" 2000 №6 - Живая вода "Московская".
- [4] Савостьянов А.М., Ермаков В.Ю., Пронин М.А. Наведение электрического тока в индукторе магнитоэластического виброизолятора при механических воздействиях. // Магнитная гидродинамика, 1991, № 1, с. 107-113.
- [5] Борисов С.В., Архипов А.И., Осипов В.И. Подвеска автомобиля: Учеб. Пособие. МАДИ ТУ, Ч.1. М., 1995.
- [6] Павлюк А.С. Подвески легковых автомобилей: Учеб. Пособие. Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1996.
- [7] Чечкин А.В. Математическая информатика. -М.: Наука. Гл. ред. физ. - мат. лит., 1991.
- [8] Жданов А.А. Земских Л.В. Беляев Б.Б. Система стабилизации углового движения космического аппарата на основе нейроноподобной системы автономного адаптивного управления. Космические Исследования, 2004, т. 42, №3, М.: 2004. С. 1-15.
- [9] Жданов А.А., Норкин Н.А., Гуриев М.А. Некоторые практические приложения метода автономного адаптивного управления // Сб. научн. тр. Искусственный интеллект в технических системах. Вып. № 19.- М.: Гос.ИФТП. 1998. С. 72-99.