

Б.Н. Белоусов д.т.н., С.Д. Попов к.т.н., И.В. Федотов,

НПЦ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Разработка алгоритма управления длинноходовой подвеской.

Одним из определяющих факторов производительности автомобиля является средняя скорость движения на маршруте, которая является важным фактором, формирующим потребительские свойства автомобиля, определяется условиями движения и параметрами технических характеристик автомобиля.

Анализируя ограничения скорости движения техническими параметрами автомобиля, можно выделить два основных их типа: прямые (ограничения по силе тяги) и косвенные. Среди косвенных ограничений, преобладающих над прочими, следует выделить ограничения по управляемости автомобиля и ограничения вследствие возникновения предельных ускорений корпуса автомобиля при движении по неровностям. Последние ограничения могут быть частично сняты, путем совершенствования систем поддрессоривания автомобилей.

В настоящее время, многие производители автотранспортных средств ищут пути создания эффективных и недорогих способов создания управляемых подвесок. Все многообразие предлагаемых систем подразделяется на два основных класса: активные подвески и регулируемые (полуактивные) подвески. Признаки деления на классы достаточно известны и разработки основ теории и практики для тех и других посвящены работы многих ученых и конструкторов.

Особенно интенсивно развиваются концепции активных и полуактивных систем управления. Некоторые из этих концепций называются «skyhook» контроллеры, т.к. их назначение заключается в том, чтобы поднять корпус автомобиля на виртуальный уровень, полностью не зависящий от дорожных неровностей. Концепции активного управления могут быть частично перенесены на полуактивные системы, сводящиеся к квази-оптимальным решениям, сравнимым с активными системами. Разработаны различные методы управления, анализ которых сделан в

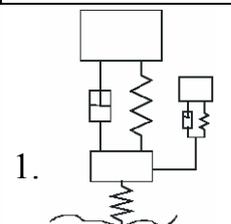
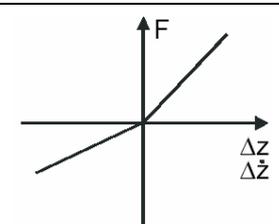
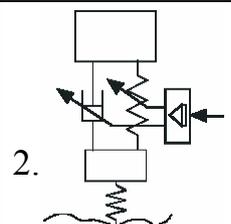
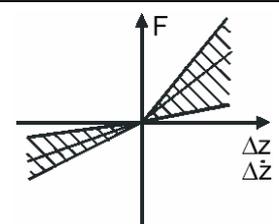
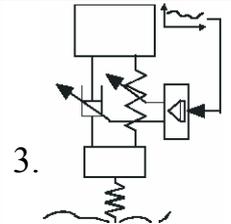
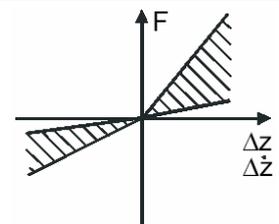
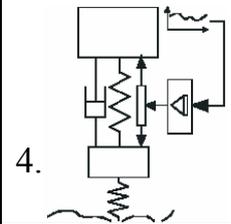
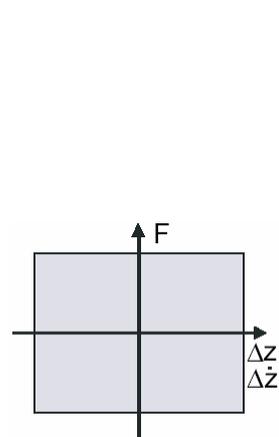
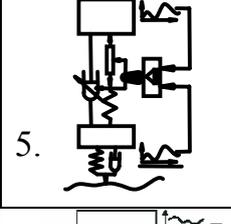
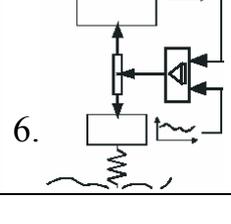
докладе. Например, используется линейно-квадратичный (LQ) вектор состояния обратной связи, который сводится к решению матричных уравнений. Логическим продолжением этого метода, является применение метода наименьшей дисперсии (MV). Результаты, базирующиеся на линейно-квадратичной формулировке, часто используются, для сравнения с другими методами управления. Нечетко-логические или нейро-сетевые системы управления дополняют или заменяют традиционные методы управления.

Наилучшими с точки зрения плавности хода являются активные подвески без упруго демпфирующих элементов. В этом случае подвеска выполняет функцию перемещения корпуса колесной машины по оптимальной траектории, вычисляемой по заложенному алгоритму. Однако трудности практической реализации такой активной подвески не позволяют добиться идеального результата.

Активные подвески с пассивными упруго демпфирующими элементами имеют в своей основе пассивную подвеску колес со свойственными ей двумя резонансами. В этом случае плавность хода машины полностью зависит от алгоритма, заложенного в САУ. Теоретически возможно создание активной подвески такого типа идентичной по обеспечиваемой плавности хода с идеальной активной подвеской без упруго демпфирующих элементов. Алгоритм управления подвеской колес можно оптимизировать в соответствии с принятой целевой функцией.

Общая классификация систем поддрессоривания автомобилей, предложенная впервые специалистом в области систем поддрессоривания Бушхардтом (Busshardt) в 1995г была несколько расширена. В связи с преимущественным распространением активных систем, в которых активный элемент устанавливается последовательно пассивному. С учетом результатов моделирования, были пересмотрены значения требований к энергии, затрачиваемой на управление, что позволяет распространить классификацию на автомобили большой грузоподъемности. Расширенная классификация представлена в таблице 1:

Таблица 1: Общая классификация систем поддресоривания.

Система поддресоривания	Схема	Диапазон усилий	Рабочий диапазон (частота)	Кол-во ИЭ/ требования к датчикам	Требования к подвод энергии	Преимущества, по сравнению с пассивной системой	
						Плавность хода	Безопасность
Пассивная	1. 		—	—	—	—	—
Адаптивная / статическое управление	2. 		$< \omega_{кор}$	$4-8 \geq 1$	$\approx 50 \text{ Вт}$ (на рег.)	15-20%	15-20%
Полу-активная	3. 		$[\omega_{кол} .. \omega_{кор}]$	$4-8 \geq 8$	$\approx 50 \text{ Вт}$ (на рег.)	20-30%	10-25%
Активная, с пассивным элементом в основе	4. 		$0 .. \omega_{кор}$	$4-8 \geq 12$	$1 - 3 \text{ кВт / тс}$	>30%	>25%
	5. 		$0 .. \omega_{кол}$	$4-8 \geq 12$	$1 - 3 \text{ кВт / тс}$	>30%	>25%
Активная, без упругодеформирующих ИЭ	6. 		$0 .. \omega_{кол}$	$4-8 \geq 12$	$1,5 - 7 \text{ кВт / тс}$	>30%	>25%

где $\omega_{кол}$, $\omega_{кор}$; — соответственно собственные частоты колес и поддресорированных масс;

Для решения поставленной задачи, была выбрана схема 5, позволяющая реализовать требуемое управление, при минимальных энергозатратах. Данная схема выгодно отличается от схемы 6, тем что имеет более высокий уровень надежности, т.к. при выходе из строя системы управления или силовых гидроприводов переходит в пассивный режим. По сравнению со схемой 4 – характеризуется меньшим энергопотреблением, ввиду того, что элементы установлены последовательно и на определенных режимах не требуется создавать усилия уравнивающие усилия пассивных элементов. Кроме того, наличие управляемых упругодемпфирующих устройств позволяет переводить систему в режим энергосбережения реализуя схему 2 или 3. Использование данного варианта на макетном образце вполне обосновано, поскольку, являясь обобщением схем 1-4 данная схема позволит произвести сравнение эффективности различных моделей, алгоритмов и конструктивных схем, при практически идентичных условиях эксперимента и при минимальных затратах и конструктивных изменениях.

Особенностью выбранной системы, является высокий уровень требований, предъявляемых к алгоритму управления. В отличие от адаптивных и полупассивных систем, активная система требует реализации устойчивого алгоритма управления, поскольку управляет подводом дополнительных мощностей, способных вывести устойчивую пассивную систему из равновесия. Данная особенность не является недостатком выбранной системы, поскольку теория управления требует применения устойчивых систем, в противном случае, качество управления будет низким. Тем не менее, данное требование, стимулирует нас к тому, чтобы по крайней мере на данном этапе исследований, отказаться от неклассических методов управления, например таких как нейросетевые алгоритмы, теория устойчивости которых, еще окончательно не сформирована.

Синтез алгоритма управления длинноходовыми модулями:

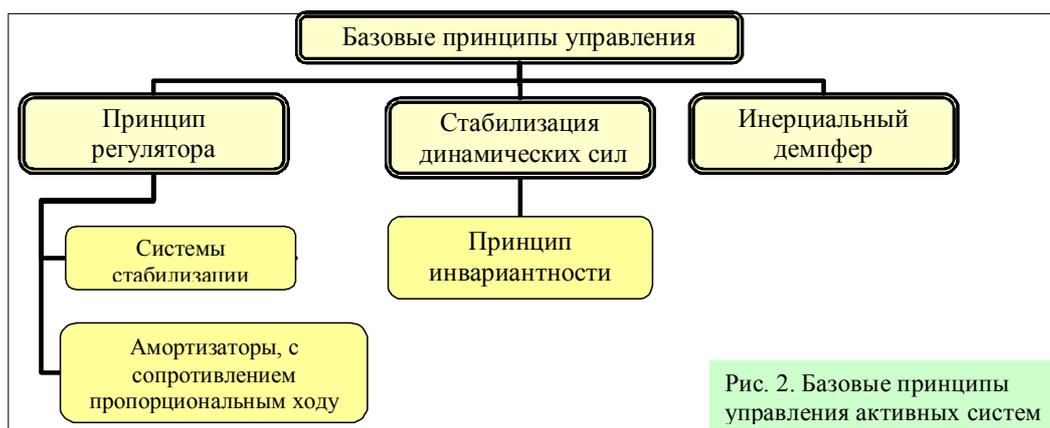
Качество работы активной подвески зависит от алгоритма, заложенного в САУ. На данном этапе работы, будем рассматривать хорошо изученные, классические робастные алгоритмы управления. Алгоритмы управления в подвесках с динамическим могут быть весьма разнообразны. В частности, оптимизацией алгоритмов занимались Фурунжиев и Останин. По результатам проведенного анализа существующих робастных алгоритмов и базовых принципов построения виброзащитных систем, наибольший интерес с точки зрения практической реализации представляют следующие принципы управления:

«стабилизация динамических сил»

«инерциальный демпфер»

принцип регулятора.

Схематически, вышесказанное представлено на рис. 2.



В настоящее время известны конструкции элементов систем поддрессирования, в которых регулирование производится по отклонению фазовых координат. Принцип регулятора реализован в различных системах стабилизации, регулирование производится по отклонению фазовых координат. Для реализации управления по отклонению не нужно знать характеристики возмущения. Требуется лишь информация об отклонении регулируемой величины. Недостатком данного принципа является трудность создания быстродействующих систем управления. В связи с чем, реализация данного метода управления наиболее подходит для схемы №2 (см. табл.1)

С точки зрения виброзащиты, представляют большой интерес системы с наличием управляющего воздействия по возмущению, который характеризуется использованием

явлений компенсации возмущений. Математическим выражением которого стал принцип инвариантности, развитый такими учеными как Щипанов, Лузин, Кулебакин, Кухтенко, Ивахненко, Кузнецова. Предметом теории инвариантности является синтез систем наилучшего качества при весьма ограниченной априорной информации о внешних возмущениях, действующих на объект. При этом задачей измерения возмущений является стремление погасить или свести к минимуму их вредное влияние.

Оба указанных принципа работы систем управления не противоречат один другому, а их синтез породил в теории управления направление комбинированного управления.

Подводя итог анализу методов управления СП, можно сформулировать следующие требования к алгоритмам АСУ подвеской колесного шасси:

Алгоритм управления должен обеспечивать принцип раздельного управления: При малых углах продольного и поперечного наклона корпуса (до $\pm 7^\circ$) наиболее актуальным является виброизоляция. При этом наиболее важным является обеспечение отсутствия резонанса колебаний несущей системы и неподрессоренных масс. Особенно это положение является актуальным для многоосных АТС. Однако при этом управляющий сигнал должен обеспечивать и стабилизации корпуса колесной машины, что способствует не только повышению скорости движения, но и безопасности. При углах наклона корпуса, превышающих указанный предел, наиболее важной становится задача обеспечения его стабилизации, что необходимо, во-первых: для повышения устойчивости, и, следовательно, безопасности движения, во-вторых: для улучшения условий работы водителя. При больших углах наклона корпуса длиннобазной многоосной машины вождение становится затруднительным.

Система уравнений, описывающих движение системы, должна быть по возможности простой, с тем, чтобы уменьшить время расчета оптимальных воздействий, а соответственно, повысить быстродействие системы.

Задача оптимального управления сформулирована сводящаяся к нахождению вектор управления, по заданным исходным данным, при котором критерий цели управления имеет экстремум. В нашей задаче управления качество регулирования будем считать удовлетворительным, если такие характеристики, как время переходного процес-

са, величина перерегулирования, коэффициент затухания, средняя квадратическая ошибка, остаются в заданных пределах. В этих условиях подходящий критерий оптимальности системы – квадратичный функционал.

$$J = \int_{t_0}^{t_1} [u^T(t)R(t)u(t) + X^T(t)Q(t)X(t)]dt \quad (1)$$

где,

$\int_{t_0}^{t_1} u^T(t)R(t)u(t)dt \quad (2)$	– мера энергии затрачиваемой на управление	$\int_{t_0}^{t_1} X^T(t)Q(t)X(t)dt \quad (3)$	– отклонение фазо- вых координат
---	--	---	-------------------------------------

Смысл функции цели отражает меру количества энергии, используемой для управления, и определяет отклонение фазовых координат. При этом накладываемый "штраф" резко увеличивается при больших отклонениях. Очевидно, что при регулировании нужно стремиться минимизировать эти величины, а задача оптимального регулирования – минимизировать принятый функционал. Для нахождения управляющего воздействия, составлены уравнения состояния с использованием принципов Лагранжа II-го рода. В соответствии со вторым требованием к системе управления, с тем чтобы максимально сократить расчетное время, при заданной точности, рассматривается линеаризованная модель его движения, причем относительно только трех фазовых координат. В результате получены уравнения движения корпуса многоосной машины, достаточно точно описывающие его колебания в указанной области изменения фазовых координат.

$$\begin{cases} \frac{d\omega_x}{dt} = \frac{1}{J_x}U_1 \\ \frac{d\omega_y}{dt} = \frac{1}{J_y}U_2 \\ \frac{dv_{cz}}{dt} = \frac{1}{M_{нодр}}U_3 - g \\ \dot{\gamma}_x = \omega_x \\ \dot{\alpha}_y = \omega_y \end{cases}$$

где: U_1, U_2, U_3 – управляющие моменты, создаваемые упругодемпфирующими элементами подвески относительно осей X, Y, и в вертикальном направлении (Z);

γ, α – углы отклонения корпуса соответственно в поперечно-вертикальной плоскости (относительно оси X) и в продольно-вертикальной плоскости (относительно оси Y);
 V_z – скорость поддрессоренной массы в вертикальной плоскости;
 $J_x; J_y$ – моменты инерции корпуса автомобиля относительно осей X и Y соответственно;
 g – ускорение свободного падения.

Полученная система позволяет вырабатывать управляющие воздействия, снижающие колебания корпуса колесной машины и обеспечивающие его

горизонтирование, что способствует повышению устойчивости движения. Система автоматического управления, может быть разбита на три независимых канала управления: два канала управления, обеспечивающих гашение угловых колебаний корпуса и его стабилизацию по углу наклона и один канал – по гашению его вертикальных колебаний. Описываемая система учитывает движение корпуса машины в целом, а не представляет собой так называемую «четверть модель», которую использует большинство исследователей, так например данная модель используется в работах Р.Изермана, Д.Фишера (институт управления в Дармштадте), Е.Кхаус (концерн Даймлер-Крайслер), что на наш взгляд дает основную ошибку управления, которая, по заявлению самих авторов достаточно велика.

Для реализации найденного управления, дополнительно был разработан алгоритм распределения управляющего воздействия по соответствующим опорно-ходовым модулям. Кроме того, для обеспечения максимального быстродействия системы, выделено несколько контуров управления. Так, наибольшим быстродействием обладает контур регулирования коэффициента демпфирования, а медленный контур охватывающий всю систему позволяет изменять давление в гидроаккумуляторах давления и противодействия соответственно.

Полученная система была опробована на нелинейной имитационной компьютерной модели, высокий уровень точности и адекватности натурному образцу которой был подтвержден экспериментальными данными, полученными в ходе испытаний, по согласованной методике испытаний, специально разработанного ходового макета. Фотография макета представлена на рисунке 3.



Рис. 3 Внешний вид экспериментального макета

В результате моделирования работы различных алгоритмов управления, как базирующихся как на различных принципах управления, так и с использованием различных функций цели, было показано, что наилучшими качественными показателями, в широкой полосе частот обладает предлагаемый алгоритм управления. При моделиро-

вании, некоторые из тестируемых алгоритмы, показывали хорошие результаты в различных октавах частот, но по интегральному критерию в широком диапазоне частот, показывали худшее качество.

В ходе тестирования модели, были получены опытным путем требования к составу и точности контролируемых параметров, а также составу и быстродействию исполнительных элементов, произведена оценка мощностных затрат, на основании которой, были уточнены некоторые значения в табл. 1.

Говоря о частотном рабочем диапазоне, по полученным данным максимальная эффективность системы достигается в области низких частот, позволяет практически устранить резонанс подрессоренных масс. Полученные данные полностью согласуются с результатами полу-

ченными авторами. Так, специалисты концерна Даймлер-Крайслер ограничиваются диапазоном частот 0..30Гц на экспериментальных образцах, однако, основная эффективность применения используемых ими систем лежит в пределах 0..5Гц.

Таблица 2: Эффективность систем применительно к пассивной

Регулируемое устройство	Колебания колес	Колебания кузова
Регулируемый амортизатор	23%	20%
Регулируемый упругий элемент	30%	12%
Регулируемые амортизатор и упругий элемент	46%	22%
Активная система	60%	55%

Дополнительно, данная проблема изложена в статье «Синтез динамической системы управления активными подвесками многоосного АТС» Журнал «Автомобильная промышленность» №4, 2004г. Белоусов.Б.Н. Меркулов И.В. Федотов И.В