

И. А. Заковырин¹, С. П. Круглов¹

¹ *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

ВОПРОС О РЕАЛИЗАЦИИ САМОНАСТРОЙКИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНОЙ ПОЛУАКТИВНОЙ ПОДВЕСКИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Аннотация. Проанализирована актуальность создания адаптивной полуактивной подвески транспортного средства. Она улучшает управляемость, увеличивает комфорт, повышает безопасность. Построения данных систем основано на использовании магнитно-реологической жидкости внутри амортизаторов. Проведен анализ широко известных методов управления адаптивной полуактивной подвеской транспортного средства: релейный алгоритм и гармонический алгоритм. Определены недостатки методов. Поставлена задача синтеза управления на основе адаптивного подхода к синтезу метода управления демпфированием.

Ключевые слова: адаптивная подвеска, адаптивная система управления, полуактивная подвеска, магнитно-реологическая жидкость, мехатронные системы.

I. A. Zakovyirin¹, S. P. Kruglov¹

¹ *Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation*

THE QUESTION OF IMPLEMENTATION OF SELF-ADJUSTMENT IN THE MANAGEMENT SYSTEM OF THE ADAPTIVE SEMIACTIVE SUSPENSION OF A VEHICLE

Abstract. The relevance of creating an adaptive semi-active vehicle suspension is analyzed. It improves handling, increases comfort, increases safety. The construction of these systems is based on the use of magnetic rheological fluid inside shock absorbers. The analysis of widely known methods for controlling an adaptive semi-active vehicle suspension: relay algorithm and harmonic algorithm is carried out. Deficiencies of the methods are identified. The task of control synthesis based on an adaptive approach to the synthesis of the damping control method is posed.

Keywords: adaptive suspension, adaptive control system, semi-active suspension, magnetic rheological fluid, mechatronic systems.

Введение. Конструкция подвески в автомобилестроении и особенности системы ее управления определяют важнейшие качества автомобиля, такие как: безопасность, комфорт, управляемость и устойчивость. Динамическое поведение пассивных систем подвески автомобиля, в основном, определяется выбором жесткости пружины и коэффициентом демпфирования. С одной стороны, подвеске необходимо быть комфортной, кузов должен быть изолирован от колебаний, вызванных дорожным покрытием. Это достигается установкой мягкой пружины и слабой степенью демпфирования. С другой стороны, транспортное средство должно обеспечить хорошую управляемость, чтобы увеличить безопасность езды. Для этого нужна жесткая, хорошо демпфированная связь между транспортным средством и дорогой. Следовательно, требования относительно комфорта и безопасности, противоречат друг другу. Здесь на помощь и приходит адаптивная подвеска.

Типы адаптивной подвески. Адаптивная подвеска бывает двух типов:

1) Активная подвеска – использует приводы, которые могут создавать направленную силу между кузовом и колесами. Это делается для обеспечения необходимого регулирования.

2) Полуактивная подвеска – эта подвеска не использует активную силу для достижения поставленной цели. Она использует для этого перестройку регулируемых параметров амортизаторов: степени демпфирования и/или жесткости пружины. В настоящее время наибольшее распространение получили адаптивные подвески с регулируемой степенью демпфирования (коэффициента демпфирования) в виде изменения внутреннего сопротивления амортизаторов [5, 10].

Полуактивная система имеет свои преимущества. Основные из них: габариты и стоимость, они значительно ниже, чем у активной системы поддрессирования.

В данной статье будет рассмотрен полуактивный тип подвески с регулируемым коэффициентом демпфирования.

Современные конструкции полуактивной подвески используют два способа регулирования степени демпфирования амортизаторов:

- при помощи электромагнитных клапанов;
- посредством магнитно-реологической жидкости.

Регулирование степени демпфирования с помощью электромагнитного клапана [6, 9]. При регулировании первым способом, изменяется проходное сечение электромагнитного регулировочного клапана, в зависимости от величины воздействующего на него тока. Чем больше ток, тем меньше проходное сечение клапана, и, соответственно, выше степень демпфирования амортизатора.

В соответствии, чем меньше ток, тем больше проходное сечение клапана, и ниже степень демпфирования амортизатора. В этом случае, регулировочный клапан устанавливается на каждый амортизатор, и может располагаться внутри или снаружи амортизатора.

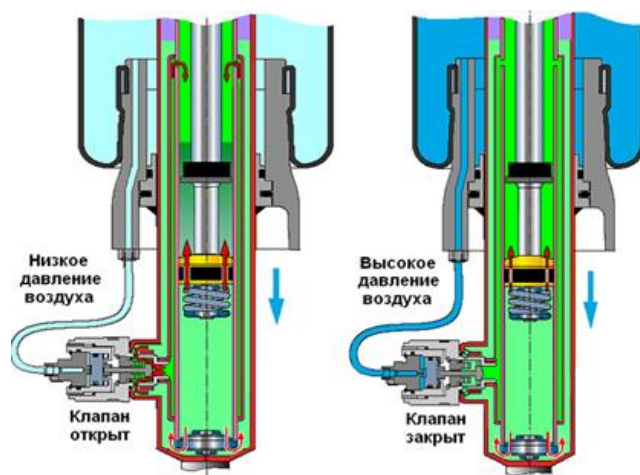


Рис. 1. Регулировочный клапан

Регулирование степени демпфирования с помощью магнитно-реологической жидкости [7]. Регулирование степени демпфирования вторым способом происходит, благодаря, особой магнитно-реологической жидкости, состоящей из мельчайших (нанометры) металлических частиц, которые выстраиваются вдоль линий магнитного поля. В таком амортизаторе отсутствуют традиционные, электромагнитные клапаны. Вместо этого, в поршне созданы каналы, через которые свободно проходит жидкость. В сам поршень встроены электромагнитные катушки. При подаче напряжения на катушки, частицы магнитно-реологической жидкости выстраиваются вдоль магнитных линий, и, благодаря этому, создается сопротивление движения жидкости по каналам, чем достигается увеличение степени демпфирования.

Принцип работы адаптивной подвески [5]. Регулирование степени демпфирования амортизаторов обеспечивает система управления, которая состоит из: блока управления, входных и исполнительных устройств. В работе системы управления адаптивной подвески, как правило, используются следующие входные устройства: датчики дорожного просвета, датчики ускорения кузова и переключатель режимов работы.

При помощи переключателя режимов работы производится настройка степени демпфирования подвески. Датчик дорожного просвета определяет величину хода подвески. Датчик ускорения кузова определяет ускорение кузова, относительно вертикальной плоскости.

Сигналы с датчиков идут в блок управления, где в соответствии с программой происходит формирование управляющих сигналов для исполнительного механизма, – регулировочного клапана или электромагнитной катушки.

Большинство видов адаптивной подвески обычно предполагает три режима работы: спортивный, комфортный и нормальный. Комфортный режим имеет относительно небольшой коэффициент демпфирования и делает ход подвески максимально плавным, сглаживая

большинство колебаний. Спортивный режим, наоборот, увеличивает степень демпфирования и делает подвеску жесткой. Нормальный режим, это нечто среднее, между спортивным и комфортным. Режимы выбираются водителем, в зависимости от текущей потребности. В каждом из режимов, система производит автоматическое регулирование степени демпфирования адаптивной подвески, в соответствии с выбранными пределами, заданных пользователем, параметров.

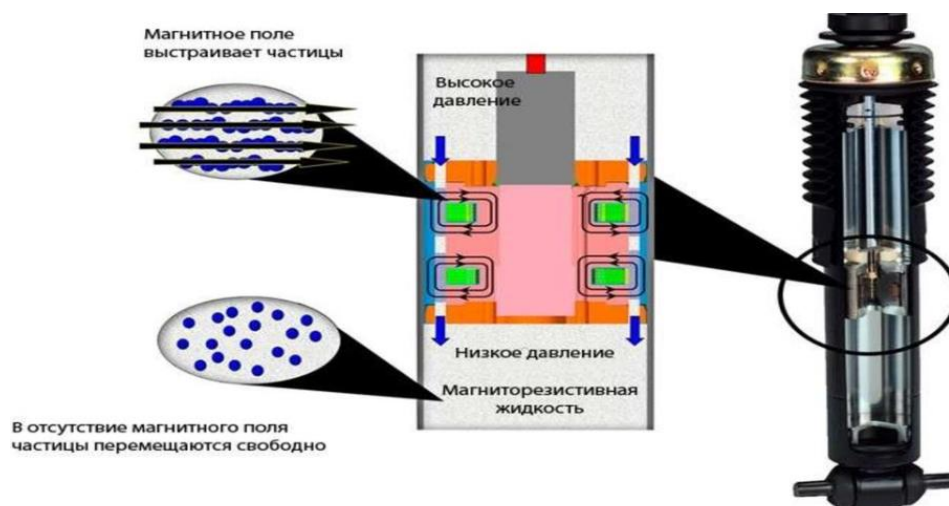


Рис. 2. Магнитно-реологическая жидкость в поршне

Качество дорожного полотна характеризуется показаниями с датчиков ускорения. Чем больше на дороге неровностей, тем сильнее раскачивается кузов. В соответствии с этим, система управления адаптивной подвески выставляет степень демпфирования так, чтобы минимизировать вертикальные ускорения.

Датчики дорожного просвета, отслеживают положение автомобиля во время его движения (ускорение, торможение, поворот). При ускорении, задняя часть автомобиля опускается ниже передней. Для поддержания положения кузова в горизонтальном положении, степень демпфирования передних и задних амортизаторов будет различная. Тоже самое справедливо и для торможения. При повороте автомобиля, вследствие сил инерции, одна из сторон автомобиля всегда находится выше другой. В таком случае, система управления отдельно регулирует левые и правые амортизаторы, чем достигается устойчивость при повороте.

На основании сигналов с датчиков, блок управления формирует управляющее воздействие для каждого отдельного амортизатора так, чтобы обеспечить максимальную безопасность и комфорт для каждого из выбранных режимов работы.

Известные варианты адаптивной подвески: Adaptive Damping System, ADS (Mercedes-Benz), Adaptive Chassis Control, DCC (Volkswagen), Adaptive Variable Suspension, AVS (Toyota), Continuous Damping Control, CDS (Opel), Electronic Damper Control, EDC (BMW) [5].

Исследование полуактивных подвесок сосредоточено в основном на двух аспектах:

1) Исследование исполнительного механизма, который гасит колебания. Недостатком существующих систем управления является малое быстродействие исполнительных устройств, электромагнитного клапана, шагового двигателя. Это показывает актуальность создания системы с высоким быстродействием. Поэтому перспективным исследованием является система с магнитно-реологической жидкостью, время реакции которой составляет около 1 миллисекунды, против 100 миллисекунд у электромагнитного клапана.

2) Алгоритм управления [4, 8]. С помощью изменения степени демпфирования полностью убрать колебания не получится, но можно сильно минимизировать их амплитуду и ускорение. Далее, в данной статье будут рассмотрены два существующих способа регулирования демпфирования в цикле колебаний:

– релейное переключение демпфирования;

– гармоническое переключение демпфирования.

Для моделирования процесса гашения колебаний корпуса транспортного средства дальше будем использовать одномассовую схему одноопорной колебательной системы с кинематическим возбуждением (рис. 3). Она соответствует одному колесу автомобиля с присоединенной массой в четверть общей массы автомобиля.

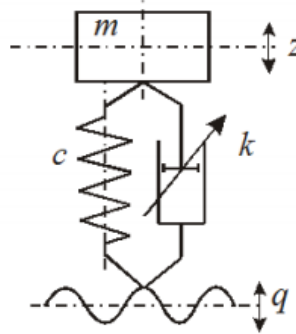


Рис. 3. Схема одномассовой одноопорной колебательной системы

Модель описывается уравнением [2]:

$$\ddot{z} = \frac{k_0 + \Delta k}{m}(\dot{q} - \dot{z}) + \frac{c}{m}(q - z),$$

где: k_0 – постоянное значение степени демпфирования; Δk – изменяемое значение степени демпфирования; m – масса $\frac{1}{4}$ части автомобиля; c – коэффициент жесткости пружины.

Для получения результатов исследования выше описанных алгоритмов, эта модель была построена в среде Matlab/Simulink. Параметры для типовой конфигурации автомобиля выбраны следующими: $c = 50000 \text{ Н/м}$; $k_0 = 2219 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$; $m = 500 \text{ кг}$.

Релейный алгоритм [4]. Описывается в виде

$$\begin{cases} k = k_{\max}, & \text{при } \begin{cases} \dot{z} - \dot{q} > 0 \text{ и } \dot{z} > 0; \\ \dot{z} - \dot{q} < 0 \text{ и } \dot{z} < 0; \end{cases} \\ k = 0, & \text{при } \begin{cases} \dot{z} - \dot{q} < 0 \text{ и } \dot{z} \geq 0; \\ \dot{z} - \dot{q} > 0 \text{ и } \dot{z} \leq 0, \end{cases} \end{cases}$$

где $k_{\max}$ – некоторое постоянное максимальное значение степени демпфирования.

Результаты такого управления представлены на рисунках 4 и 5. При этом принято: $k_{\max} = 20000 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$. Входным сигналом является синусоида с амплитудой 0.1 м, и частотой 15 рад/с (рис. 4) и случайный входной сигнал, с среднеквадратичным отклонением – 1 м, пропущенный через апериодическое звено с постоянной времени $T = 0.9 \text{ с}$ (рис. 5). На верхнем графике рис.4 представлены: входной сигнал (дорожное полотно, q – синий), перемещение (z) $\frac{1}{4}$ части массы автомобиля без изменения демпфирования (желтый), и перемещение (z) $\frac{1}{4}$ массы автомобиля с релейным алгоритмом управления (черный).

На нижнем графике рис.4 представлено изменение ускорения подпружиненной массы с адаптивной подвеской (синий) и без адаптивной подвески (оранжевый). Как видно из графиков, этот метод дает значительное уменьшение амплитуды колебаний, но при этом имеет значительную амплитуду и высокое изменение частоты ускорений, что может негативно сказаться на уровне комфорта, а так же, что немаловажно, на прочностных характеристиках системы.

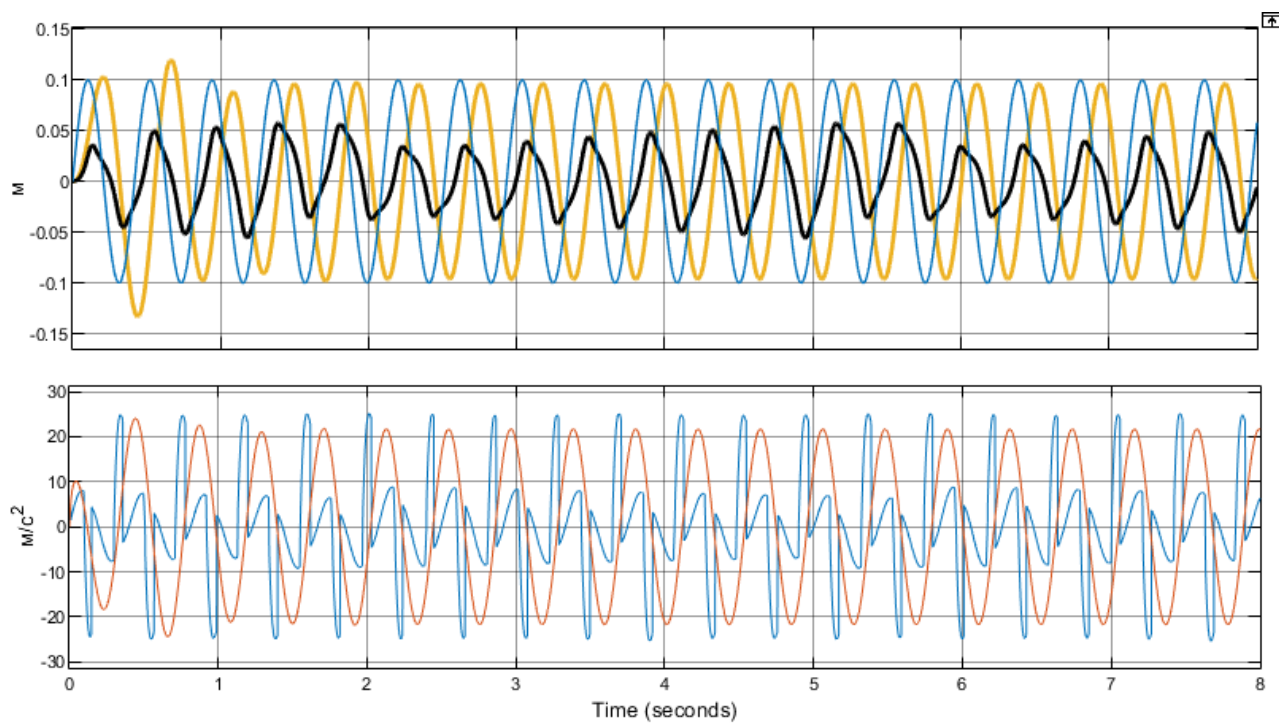


Рис. 4. Мгновенное переключение демпфирования с синусоидальным входным сигналом

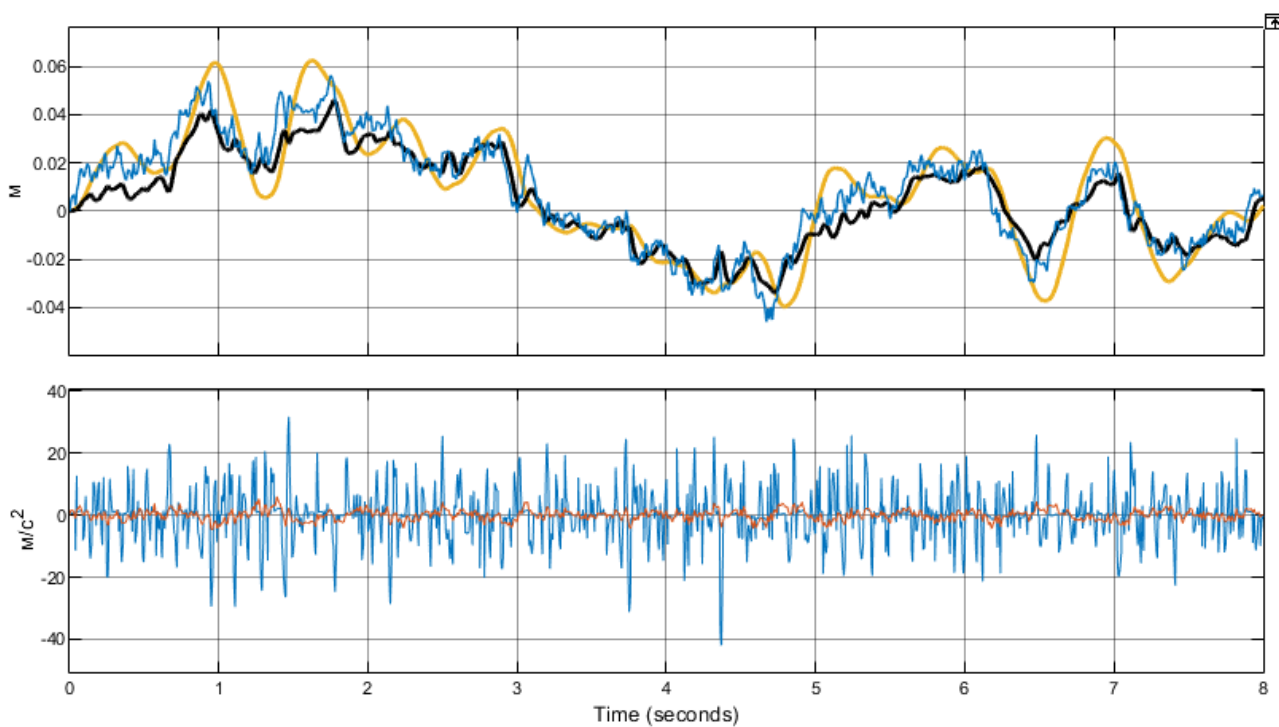


Рис. 5. Мгновенное переключение демпфирования со случайным входным сигналом

Алгоритм гармонического переключения [4]. Он описывается зависимостью

$$k = 0.5k_{\max} (1 + \sin(2\omega t + \varphi)),$$

где ω – частота возмущения; φ – сдвиг фазы изменения демпфирования относительно фазы возмущения.

Результаты исследования этого алгоритма представлены на рисунках 6 и 7. При этом принято: $k_{\max} = 20000 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$, $\varphi = -0.74$ рад. Из графика видно, что в сравнении с релейным алгоритмом, уменьшение амплитуды колебаний уже не столь существенное. Из недостатков стоит отметить, что для управления алгоритмом, необходимо изначально знать частоту возмущающих воздействий, а так же сдвиг фаз между возмущающими колебаниями и управлением, в противном случае, управление не будет эффективным.

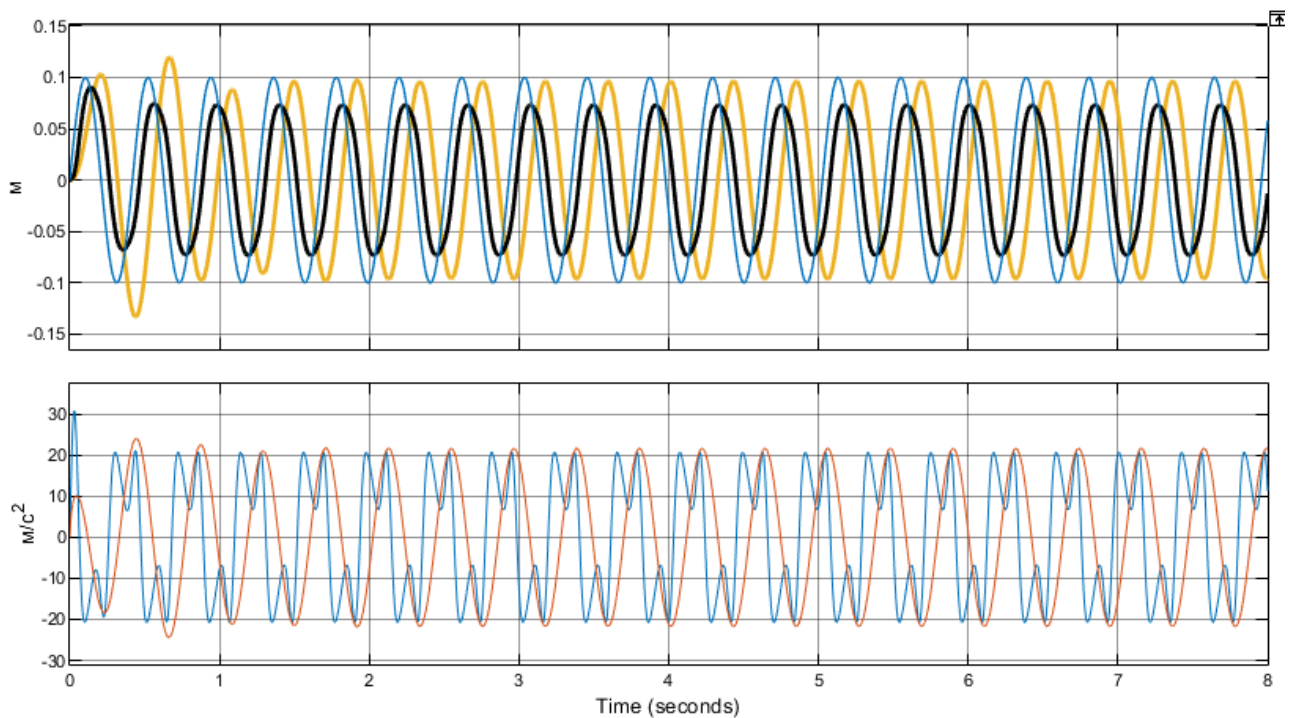


Рис. 6. Гармоническое переключение демпфирования с синусоидальным входным сигналом

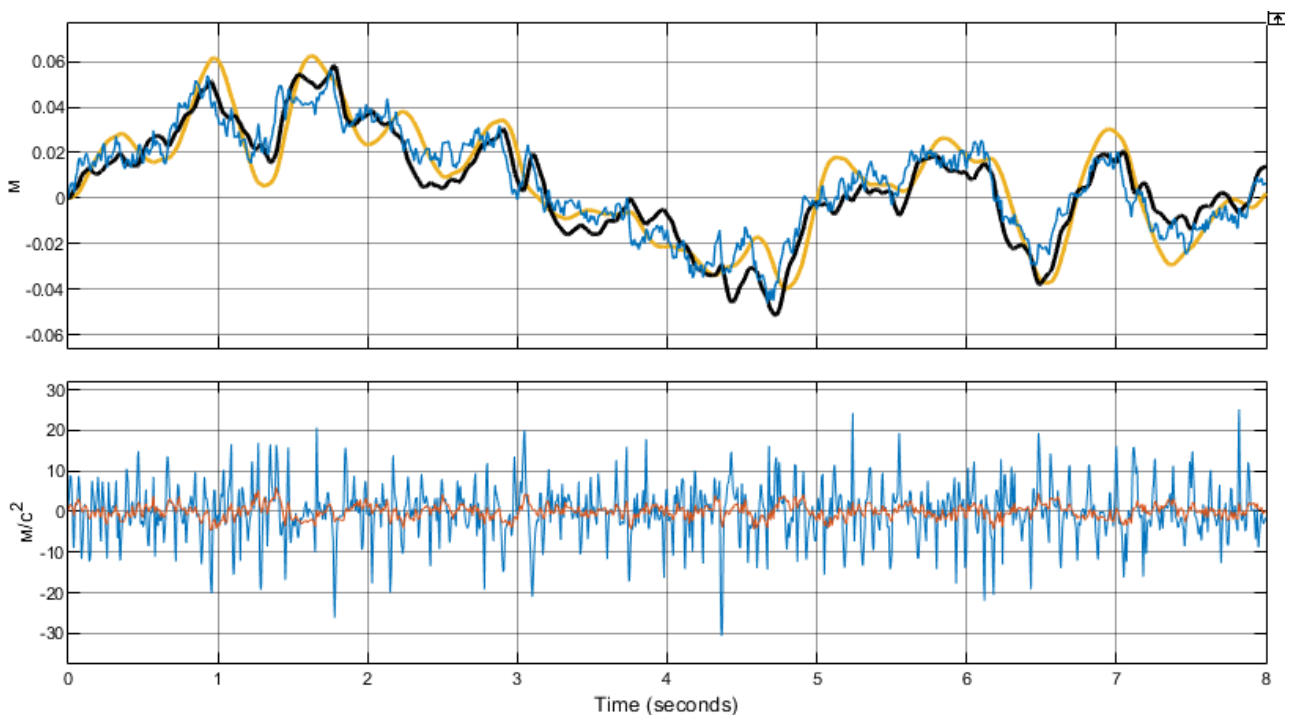


Рис. 7. Синусоидальное переключение демпфирования со случайным входным сигналом

Сравним результаты управления этих алгоритмов по среднеквадратичному отклонению (СКО). На рисунках 8 и 9 приведены графики СКО с синусоидальным и случайным входными сигналами, соответственно. На верхнем графике СКО по перемещению. На нижнем графике – ускорения.

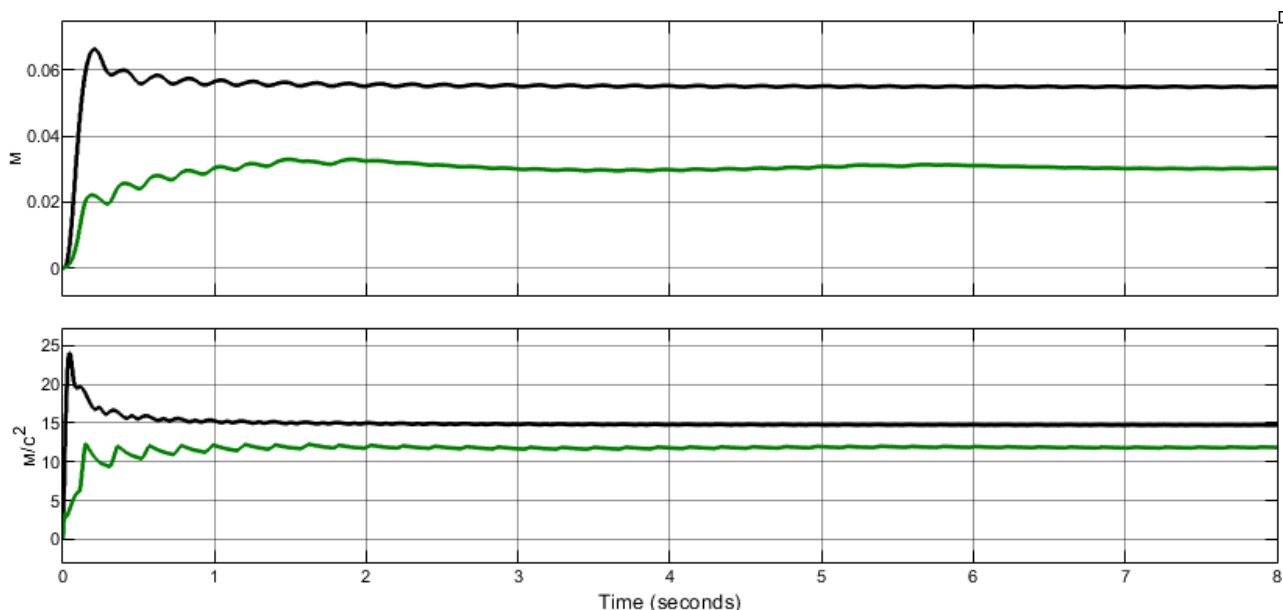


Рис. 8. СКО с синусоидальным входным сигналом

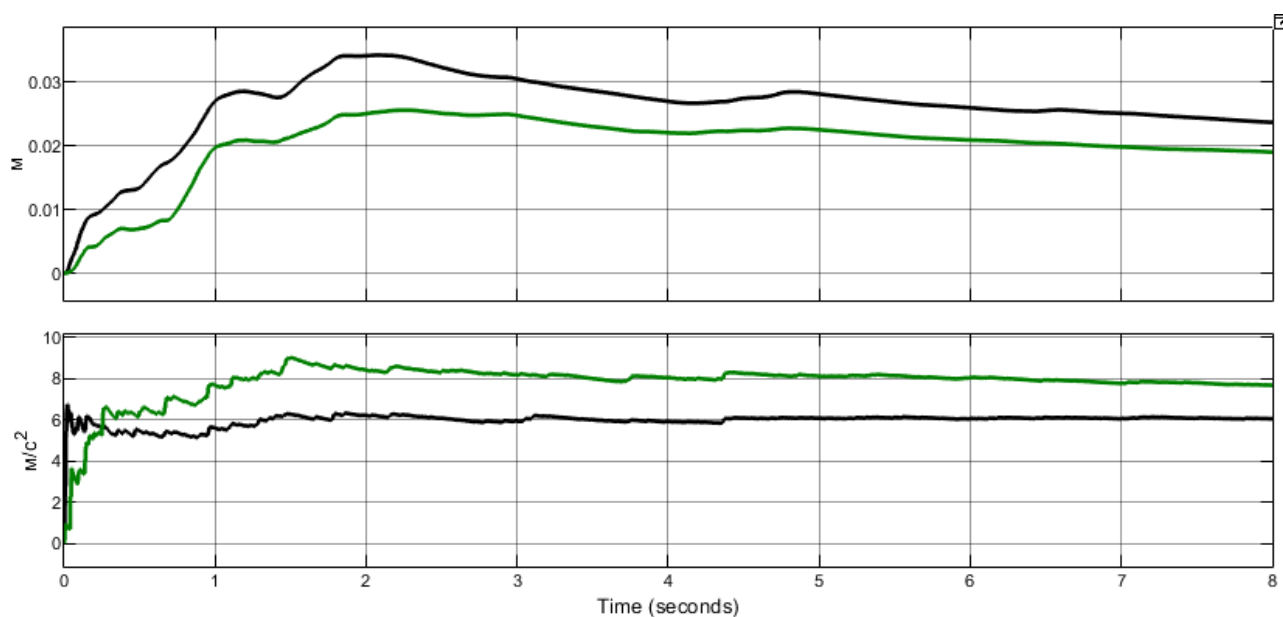


Рис. 9. СКО со случайным входным сигналом

Заключение. Из всего выше перечисленного можно сделать вывод, что рассмотренные выше методы регулирования степени демпфирования приводят к заметному снижению амплитуд колебаний корпуса транспортного средства, в сравнении с применением пассивной (обычной) подвески. Достоинством этих методов является простота их реализации. В качестве недостатков следует указать: для релейного алгоритма – это большая дискретность управления, и отсутствие подстройки к текущим условиям и характеристикам объекта управления; для гармонического алгоритма – необходимость текущей информации о частоте вынужденных колебаний (требуется специальный измеритель), сложность в выборе параметра φ , а также ограниченность использования системы только гармоническими возмуща-

ющими воздействиями (исследования этого закона управления на случайном внешнем воздействии указал на его неэффективность).

Перспективным направлением формирования закона управления для полуактивной подвески является метод построения адаптивного управления, который направлен на устранение указанных недостатков. Адаптивная система управления позволит построить эффективный управляющий сигнал в условиях априорной неопределенности параметров объекта управления и внешних возмущений. Предварительные исследования такого закона управления, построенного на идентификационном алгоритме управления, показывают в сравнении с рассмотренными исследованиями существенное, примерно в 2-3 раза, снижение амплитуды колебаний и ускорений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов А. В., Худорожков С. И. Моделирование и управление системой поддрессирования автомобиля в среде Matlab – Simulink. – Иркутск, 2018. – С. 17.
2. Елисеев С. В., Кашуба В. Б., Кинаш Н. Ж., Елисеев А. В. Динамическое гашение колебаний: введение дополнительных связей, рычажные взаимодействия и физические эффекты // сборник статей «Вестник ИрГТУ Т.21». – Иркутск, 2017. – №1. С. 10-15.
3. Катеев А. В., Алгоритм управления адаптивной подвеской автомобиля // Nauka-rastudent.ru. – Уфа, 2014. – No. 11.
4. Чернышов К. В., Хрипков М. Ю. Обзор основных алгоритмов регулирования демпфирования в подвеске автомобиля // Международный научный журнал «Символ науки». – Волгоград, 2016. – №4. – С. 140-143.
5. Системы современного автомобиля: сайт. – URL: http://systemsauto.ru/pendant/adaptive_chassis.html (дата обращения: 20.04.2020). – Текст электронный.
6. Устройство пневмоподвески автомобиля: сайт. – URL: <https://pnevmopodveska-club.ru/topic/113-ustroystvo-pnevmopodveski-avtomobilya/> (дата обращения: 20.04.2020). – Текст электронный.
7. McGrath Ford Mustang: сайт. – URL: <https://www.mcgrathauto.com/2019-ford-mustang.htm> (дата обращения: 20.04.2020). – Текст электронный.
8. Livshits A.V., Filippenko N.G., Homenko A.P., Kargapol'tsev S.K., Gozbenko V.E., Dambaev Z.G. Mathematical modelling of the processes of the high-frequency heating of thermoplastics and quality improvement of welded polymeric items // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. T. 14. № 2. С. 219-226.
9. Ларченко А.Г., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Попов С.И. Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов // Патент на полезную модель RU 132209 U1, 10.09.2013. Заявка № 2013115531/28 от 05.04.2013.
10. А.А., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Попов С.И., Филатова С.Н. Устройство для определения коэффициентов теплоотдачи Александров //Патент на полезную модель RU 155337 U1, 10.10.2015. Заявка № 2014154288/28 от 30.12.2014.

REFERENCES

1. Popov A. V., Khudorozhkov S. I. Modeling and control of the car suspension system in the environment of Matlab - Simulink. Irkutsk, 2018, 17p.
2. Eliseev S. V., Kashuba V. B., Kinash N. Zh., Eliseev A. V. Dynamic damping of vibrations: introduction of additional bonds, lever interactions and physical effects [collection of articles «Vestnik ISTU T.21»]. Irkutsk, 2017. no. 1, pp. 10-15.
3. Kateev A. V., Algorithm for controlling the adaptive suspension of a car [Nauka-rastudent.ru.] Ufa, 2014. no. 11.

4. Chernyshov K. V., Khripkov M. Yu. Overview of the basic algorithms for damping control in a car suspension [International scientific journal "Symbol of Science"]. Volgograd, 2016. no. 4, pp. 140-143.
5. Modern car systems: site. - URL: http://systemsauto.ru/pendant/adaptive_chassis.html (accessed date: 04/20/2020). - The text is electronic.
6. Car air suspension device: site. - URL: <https://pnevmapodveska-club.ru/topic/113-ustroystvo-pnevmapodveski-avtomobilya/> (accessed: 04/20/2020). - The text is electronic.
7. McGrath Ford Mustang: website. - URL: <https://www.mcgrathauto.com/2019-ford-mustang.htm> (accessed: 04/20/2020). - The text is electronic.
8. Livshits A.V., Filippenko N.G., Homenko A.P., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Dambaev Z.G. Mathematical modelling of the processes of the high-frequency heating of thermoplastics and quality improvement of welded polymeric items // JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. T. 14. № 2. С. 219-226.
9. Larchenko A.G., Livshic A.V., Filippenko N.G., Popov S.I. Ustroistvo diagnostiki detalei iz poliamidnih materialov // Patent na poleznuyu model RU 132209 U1 10.09.2013. Zayavka № 2013115531/28 ot 05.04.2013.
10. A.A. Livshic A.V., Filippenko N.G., Popov S.I., Filatova S.N. Ustroistvo dlya opredeleniya koeffitsientov teplootdachi Aleksandrov // Patent na poleznuyu model RU 155337 U1 10.10.2015. Zayavka № 2014154288/28 ot 30.12.2014.

Информация об авторах

Заковырин Игорь Александрович – магистрант кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ZakIgor@bk.ru

Круглов Сергей Петрович – д. т. н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Authors

Zakovyryn Igor Alexandrovich – post-graduate student of the Department "Automation of production processes", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ZakIgor@bk.ru

Sergey Petrovich Kruglov – Doctor of Engineering Science, Prof., the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru