

УДК 629.3.027.3

В.С. Кончак¹, С.В. Хитриков¹, Д.А. Швец¹, Я.А. Богданов¹,
Ю.И. Николаев², В.Л. Ефремов²

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МОДЕЛИ АДАПТИВНОГО АМОРТИЗАТОРА

Исследуется проектируемый образец адаптивного амортизатора, предназначенного для использования в системах поддрессирования грузовых автомобилей, работающих в условиях бездорожья. Приводится схема испытаний и используемое для их проведения оборудование. Дается описание методов контроля точностных характеристик измерительного и управляющего оборудования, а также методов моделирования управляющих процессов для получения характеристик исследуемого образца. Предлагаются программа и методика испытаний.

Введение

Проектирование транспортных средств, работающих в сложных дорожных условиях, связано с необходимостью разработки систем поддрессирования, способных гасить вертикальные колебания движущегося автомобиля и тем самым улучшать комфортность работы водителя, безопасность перевозки пассажиров и транспортировки грузов. Для этой цели используются управляемые подвески, которые на основании измеренной информации о величине перемещения катящегося по профилю дороги колеса изменяют в реальном масштабе времени сопротивление взаимному перемещению поддрессированной и неподдрессированной масс, регулируют уровень их колебаний. Такие подвески получили название адаптивных. Реализация регулирования силы сопротивления в них может быть выполнена либо с помощью электромагнитных клапанов, либо за счет использования в качестве наполнителя цилиндра амортизатора жидкости [1], вязкость которой изменяется в зависимости от величины приложенного магнитного поля. Управление магнитным полем в обоих случаях осуществляется с помощью электронного блока управления (ЭБУ).

Наиболее распространенными в мировой практике адаптивными подвесками являются Adaptive Damping System, ADS (Mercedes-Benz) [2], Adaptive Variable Suspension, AVS (Toyota) [3], Adaptive Chassis Control, DCC (Volkswagen) [4], Continuous Damping Control CDS (Opel) [5], Electronic Damper Control EDC (BMW) [6]. В перечисленных подвесках для управления демпфированием используют электромагнитные дроссели и оборудуют такими подвесками автомобили представительского класса для создания комфортности передвижения по дорогам с хорошим и удовлетворительным покрытием.

Магнитореологическая жидкость как средство противодействия перемещению поршня амортизатора используется в конструкции подвесок автомобилей Cadillac, Chevrolet (система MagneRide от General Motors) и Magnetic Ride от Audi. Грузовые автомобили грузоподъемностью от двух до шести тонн, в которых используются адаптивные амортизаторы с магнитореологической жидкостью, производит только фирма Stewart & Stevenson. Производителем и поставщиком для них магнитореологической жидкости служит фирма «LORD Corporation» [7].

Целью настоящей работы является разработка методов и средств экспериментальных исследований как самого амортизатора, так и системы управления его исполнительного органа – управляемого дросселя, создающего сопротивление перемещению штока амортизатора с целью гашения колебаний поддрессированной массы.

1. Назначение исследований

При разработке новых образцов систем поддрессирования возникает необходимость проведения их экспериментальных исследований в различных режимах нагружения. Применение же новых принципов функционирования, закладываемых в конструкцию изделия, требует про-

верки на соответствие техническому заданию в различных условиях эксплуатации. Наиболее информативным средством для изучения реальных свойств разрабатываемого изделия являются натурные испытания (стендовые и дорожные). Основное назначение испытаний – это получение экспериментальных данных, позволяющих вычислить такие параметры системы поддресоривания, как собственная частота колебаний, коэффициент затухания, жесткость, импульсная переходная и передаточная характеристики и другие показатели, отображающие ее физические свойства. Кроме того, необходимо получить функциональную зависимость силы сопротивления колебаний поддресоренной массы от перемещения и скорости движения штока амортизатора, что позволит построить базу знаний, в рамках которой и будут работать алгоритм и система управления адаптивным амортизатором.

2. Схема испытаний и используемое оборудование

Испытательный стенд фактически является физической моделью условий, в которых реально работает исследуемое изделие. Поэтому он должен содержать систему нагружения, имитирующую воздействие на амортизатор неровностей дороги, и систему управления режимом демпфирования. В качестве системы нагружения используется оборудование стенда фирмы SCHENK с сервогидравлическим управлением. В этом оборудовании исполнительным устройством является гидравлический цилиндр, управляемый усилительной стойкой, которая обеспечивает автоматический контроль и стабилизацию управляющих сигналов. Схема испытательного стенда изображена на рис. 1. Адаптивный амортизатор 5 закреплен одним концом на поршне гидравлического цилиндра 10, а другим – на неподвижной балочке, ограничивающей перемещение. Температура $T(i\Delta t)$ циркулирующей в системе амортизатора жидкости измеряется датчиками 3, установленными на управляющем дросселе 1. Результаты ее измерения накапливаются в компьютере системы управления силовым стендом.

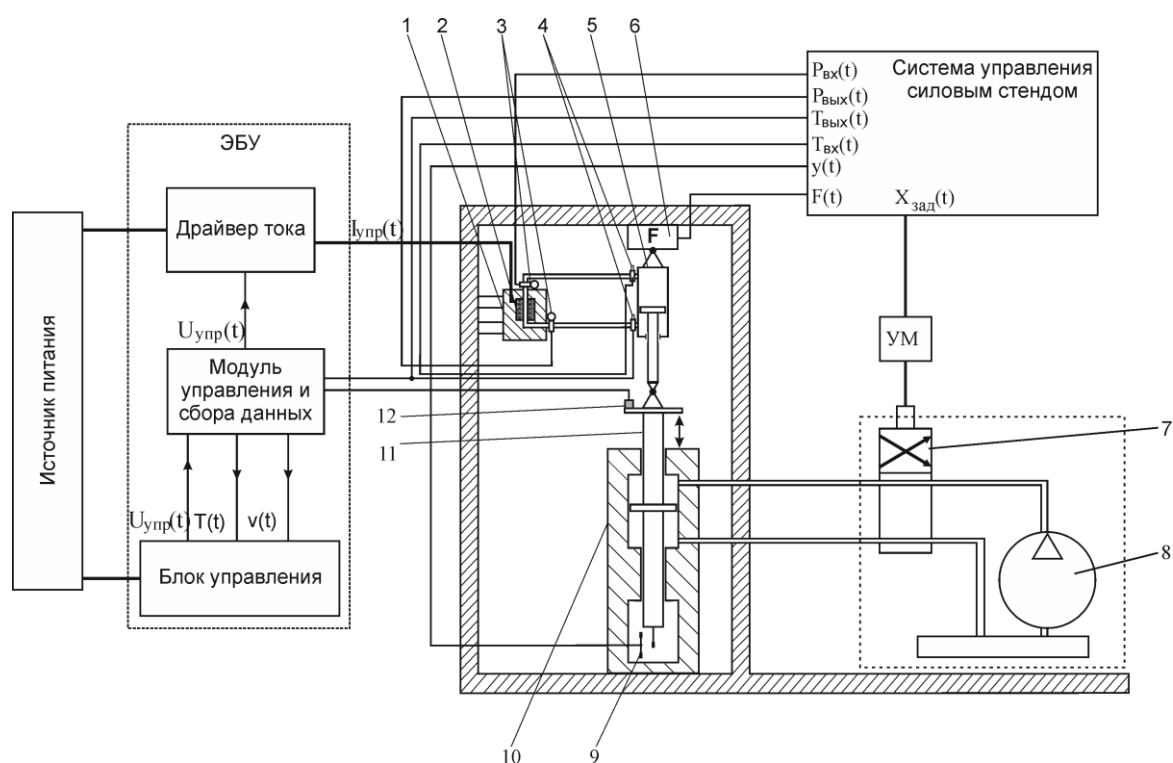


Рис. 1. Схема испытательной установки для исследования демпфирующих свойств адаптивного амортизатора (1 – управляющий дроссель; 2 – катушка; 3 – датчики температуры; 4 – датчики давления; 5 – адаптивный амортизатор; 6 – датчик силы; 7 – сервогидравлический клапан; 8 – гидронасос; 9 – датчик перемещения; 10 – гидроцилиндр; 11 – поршень гидроцилиндра; 12 – датчик скорости; УМ – усилитель мощности)

Сигнал $X_{\text{зад}}(t)$, сформированный системой управления силовым стендом, подается на усилитель мощности и с помощью сервогидравлического клапана 7 управляет работой гидронасоса 8, который и обеспечивает перемещение с нужной скоростью поршня 11 гидроцилиндра 10. Величина перемещения измеряется датчиком 9, а его скорость – датчиком 12. Реакция на перемещение поршня измеряется датчиком силы 6. Регулирование силы сопротивления адаптивного амортизатора осуществляется ЭБУ, который состоит из модуля сбора данных, драйвера тока и блока управления (см. рис. 1).

В исследовательском режиме блок управления должен обеспечить изучение поведения адаптивного амортизатора при постоянном управляющем токе и переменной амплитуде функции перемещения штока амортизатора. При этом на катушку 2 дросселя подается постоянный ток $I_{\text{упр}}(t)$, который формируется в драйвере тока путем подачи на его вход напряжения $U_{\text{упр}}(t)$ с цифроаналогового преобразователя (ЦАП) модуля сбора данных. Цифровое значение управляющего сигнала $U(t)$ в соответствии с алгоритмом вырабатывается модулем управления в зависимости от величины скорости перемещения $V(t)$ подпрессоренной массы и температуры $T(t)$ жидкости в амортизаторе. Функция скорости перемещения $\dot{y}(t)$, измеренная датчиком 12, преобразуется с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и сохраняется в памяти блока управления.

Результаты измерения: реализации функции давления $P(t)$, температуры жидкости $T(t)$, функции перемещения штока амортизатора $y(t)$ и реакции на нее $F(t)$ – сохраняются в памяти компьютера системы управления силовым стендом и передаются для дальнейшей обработки.

На рис. 2 показан снимок стенда, изготовленного в соответствии со схемой на рис. 1 и предназначенного для испытания адаптивного амортизатора.

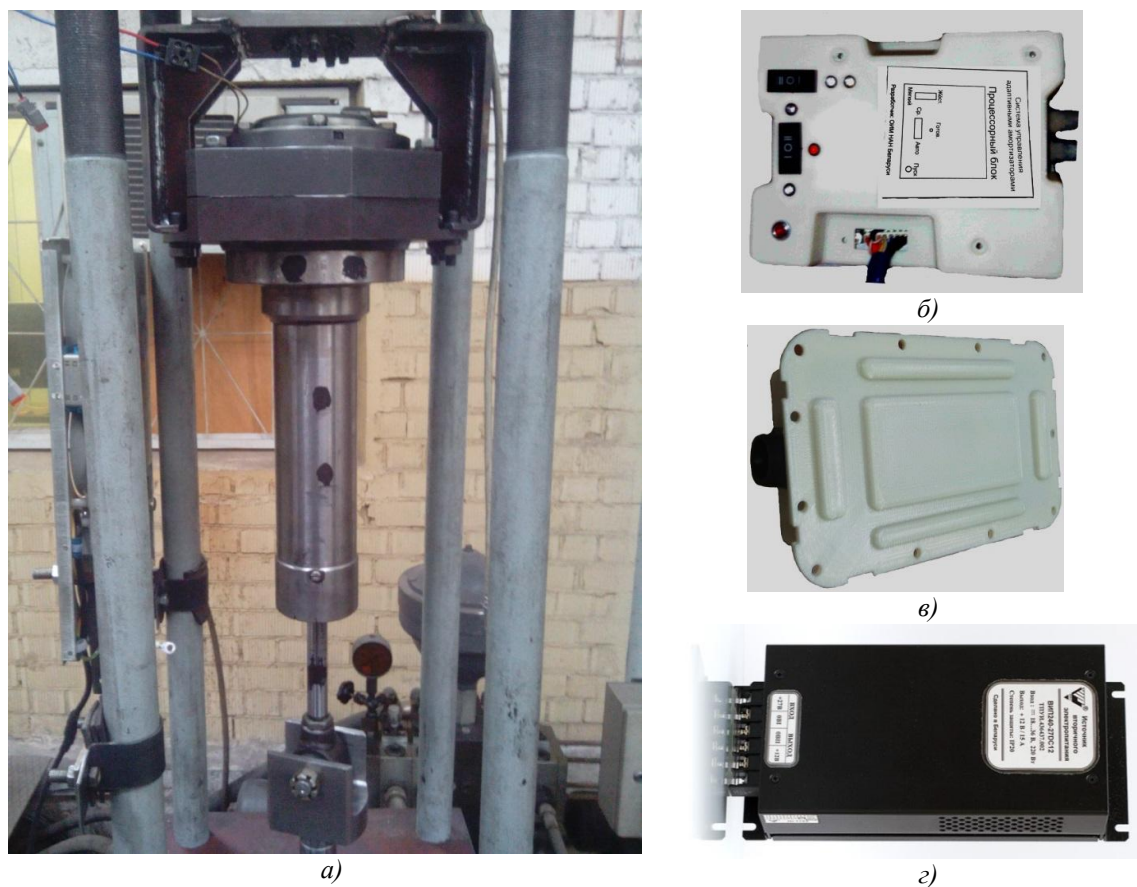


Рис. 2. Снимок стенда для исследования демпфирующих свойств адаптивного амортизатора: а) силовой стенд для испытания амортизатора; б) блок управления; в) модуль сбора данных; г) драйвер тока

Схема испытаний и макет ЭБУ в составе модуля сбора данных, драйвера тока и блока управления разработаны и изготовлены специалистами Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, а конструкторская документация на оснастку стенда и макет адаптивного амортизатора – специалистами ОАО «Минский завод колесных тягачей».

3. Программа испытаний макетного образца адаптивного амортизатора

В соответствии со схемой испытательной установки (см. рис. 1) у исследуемого объекта отсутствует подрессоренная масса. Поэтому условие динамического равновесия запишем в виде уравнения

$$r\dot{y}(t) + cy = f \sin \omega t, \quad (1)$$

решением которого будет функция перемещения

$$y = A \sin(\omega t + \alpha),$$

где r – коэффициент сопротивления перемещению; c – жесткость механической конструкции; f – амплитуда вынуждающей силы; A – амплитуда вынужденных колебаний.

Следует заметить, что уравнение (1) пригодно только для тех объектов, у которых колебания, возникшие под воздействием гармонической вынуждающей силы, будут также гармоническими. В противном случае система будет нелинейной. Если такую систему при исследовании возбуждать негармонической функцией, то будет нарушено свойство суперпозиции. Методы построения в системах функциональной зависимости выходного сигнала от входа изложены в работе [9].

Таким образом, в процессе эксперимента в качестве функции перемещения используются гармонические сигналы. При этом испытания выполняются в последовательности, изложенной ниже.

3.1. Подготовка стенда к работе

Все описанные в данном разделе операции выполняются на стенде до монтажа на нем испытуемого изделия. Целью их проведения является исследование точностных характеристик измерительного оборудования и динамических свойств самого стенда. В соответствии с методикой проведения стендовых испытаний, изложенной в [8], подготовке стенда к работе должно предшествовать выполнение поверочных работ измерительного и управляющего оборудования, системы связи с объектом и тарировка датчиков.

Процесс колебаний гидравлического цилиндра осуществляется под управлением сервогидравлического клапана, от точности срабатывания которого зависит точность воспроизведения частоты колебаний поршня гидроцилиндра. Для контроля частотного диапазона необходимо протестировать систему управления стенда на временном интервале в одну секунду гармониками в 1, 2, 3, 5, 7 Гц. Контроль точности воспроизведения частоты колебаний осуществляется с использованием штатного датчика перемещения. По результатам анализа полученной информации делается вывод о точности воспроизведения частоты колебаний гидроцилиндра. При этом гармоника первой частоты на временном интервале в одну секунду уложится точно один раз, второй – два раза, третьей – три раза и т. д.

Гидравлический стенд, являясь динамической системой, имеет свою передаточную характеристику, которую следует учитывать в процессе проведения исследовательских испытаний. Увеличение частоты колебаний приводит к возрастанию скорости перемещения поршня, а следовательно, в результате возрастания силы сопротивления – к изменению амплитуды колебаний. Исходными данными для такого анализа являются результаты испытания стендового оборудования, проведенного в соответствии со следующей программой.

3.2. Программа проведения исследования частотного диапазона гидроцилиндра стенда

Для проверки правильности отработки частоты колебаний поршня гидроцилиндра необходимо осуществить следующие действия:

– выполнить моделирование процессов тестовых сигналов

$$y_k(i\Delta t) = A_0 \sin 2\pi k\Delta f i\Delta t$$

для $i = 0, 1, 2, \dots, 1023$, $k = 1, 4, 8, 12, 20, 28$, $\Delta f = 0,25$ Гц, $\Delta t = 0,000977$ с и для $\Delta f = 0,24414$ Гц; $\Delta t = 0,001$ с;

– выдать последовательно на стенд полученные реализации, измерить функцию перемещения поршня, результат измерения сохранить;

– по результатам измерения функции перемещения поршня гидроцилиндра выполнить спектральный анализ полученной реализации. Сравнить величину частоты, вычисленной в результате анализа, с заданной. По точности совпадения частот колебаний (заданной и полученной экспериментально) судят о правильности работы сервогидравлического клапана.

Для проверки степени зависимости амплитуды колебаний поршня гидроцилиндра от частоты необходимо выполнить моделирование ансамбля реализаций гармонических функций:

$$y_k(i\Delta t) = A_k \sin 2\pi k\Delta f i\Delta t$$

для $i = 0, 1, 2, \dots, 4095$; $k = 1, 2, 3, \dots, 40$; $\Delta f = 0,25$ Гц; $\Delta t = 0,000977$ с.

Изменения амплитуды A_k функции перемещения поршня гидроцилиндра осуществляются в соответствии с ГОСТ 53816–2010 [10], а также с рекомендацией завода-изготовителя стендового оборудования. В качестве начального приближения в процессе испытания для каждой частоты используется величина амплитуды, указанная в рекомендации, а по результатам испытания вносится корректировка и строится таблица, которая применяется затем при моделировании ансамбля реализаций для испытания адаптивного амортизатора на силовом стенде.

Приведенная в данной работе таблица была скорректирована в соответствии с технической характеристикой используемого гидроцилиндра, у которого амплитуда скорости перемещения штока не должна превышать 0,6 м/с. Использование данного условия позволило на всем частотном диапазоне получить максимально возможную амплитуду функции перемещения (от 80 мм на низкой частоте до 8 мм на частоте 10 Гц) и, как видно из таблицы, постоянную скорость перемещения, благодаря чему гарантируется высокое качество управления демпфированием.

Исходные данные для формирования гармонических функций системой управления

Номер гармоники	Частота, Гц	Амплитуда перемещения, мм	Амплитуда скорости, м/с	Номер гармоники	Частота, Гц	Амплитуда перемещения, мм	Амплитуда скорости, м/с
1	0,25	80	0,125664	21	5,25	16	0,527789
2	0,50	80	0,251328	22	5,50	15	0,518364
3	0,75	80	0,376992	23	5,75	15	0,541926
4	1,00	80	0,502656	24	6,00	14	0,527789
5	1,25	68	0,534072	25	6,25	14	0,549780
6	1,50	57	0,537214	26	6,50	13	0,530930
7	1,75	48	0,527789	27	6,75	13	0,551351
8	2,00	42	0,527789	28	7,00	12	0,527789
9	2,25	38	0,537214	29	7,25	12	0,546638
10	2,50	34	0,534072	30	7,50	11	0,518364
11	2,75	31	0,535643	31	7,75	11	0,535643
12	3,00	28	0,527789	32	8,00	10	0,502656
13	3,25	26	0,530930	33	8,25	10	0,518364
14	3,50	24	0,527789	34	8,50	10	0,534072
15	3,75	23	0,541926	35	8,75	9	0,494802
16	4,00	21	0,527789	36	9,00	9	0,508939
17	4,25	20	0,534072	37	9,25	9	0,523076
18	4,50	19	0,537214	38	9,50	9	0,537214
19	4,75	18	0,537214	39	9,75	8	0,490090
20	5,00	17	0,534072	40	10,00	8	0,502656

3.3. Моделирование ансамбля реализаций функции перемещения поршня гидроцилиндра в режиме стендовых испытаний

Исследование адаптивного амортизатора на стенде осуществляется в режиме вынужденных колебаний, источником которых является модель неровности поверхности дороги, по которой движется автомобиль. Амортизатор – это средство гашения колебаний подрессоренной массы автомобиля. Однако учитывая, что реальная система подрессоривания нелинейная, для стендовых испытаний в качестве функций нагружения используются гармонические функции [9] в диапазоне частот 0,25–10,0 Гц с дискретностью по частоте $\Delta f = 0,25$ Гц.

Величина амплитуды для каждой из частот приведена в таблице, которая построена в соответствии с программой, изложенной в подразд. 3.2. Дискретность отсчетов по времени $\Delta t = 0,000977$ с, а период реализации $T = 4,0$ с. Число отсчетов реализации $N = 4096$. Учитывая, что процесс измерений проводится на установившемся режиме, реализация будет содержать четыре периода, чтобы избежать появления переходных процессов. Для формирования первого периода (разгона стенда) ординаты вводимой гармонической функции $x(i\Delta t)$ умножаются на весовую функцию i/N , т. е. $X(i\Delta t) = x(i\Delta t) \cdot i/N$, где $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Второй и третий периоды реализации – это ординаты гармонической функции $x(i\Delta t)$ без изменения (второй период – выход на режим установившихся колебаний, третий – рабочий режим). Ординаты четвертого периода (режим затухания колебаний) вычисляются как $X(i\Delta t) = x(i\Delta t) \cdot 1/i$. Измерение ординат функции сопротивления $F(i\Delta t)$ выполняется синхронно с выдачей ординат функции перемещения на протяжении третьего периода.

Построенные таким образом процессы формируются в ансамбль, содержащий 40 реализаций, которые используются в качестве функций нагружения исследуемого объекта, хранятся в отдельном файле системы управления испытательным стендом и применяются во всех режимах испытания адаптивного амортизатора.

4. Использование макета электронного блока управления в режиме динамических испытаний

Амортизатор устанавливается на стенде, как показано на рис. 1. Испытания проводятся в двух режимах: при отсутствии управляющего тока в катушке электромагнита и в режиме управления с использованием электронного блока управления. Процесс управления силовым цилиндром для обоих режимов идентичен и будет выполняться в соответствии со следующими правилами. В качестве управляющего сигнала используется ансамбль реализаций, сформированный в соответствии с методикой моделирования функции нагружения, изложенной в подразд. 3.3 настоящей работы. Процесс выдачи функции нагружения на исполнительный цилиндр и измерение функции сопротивления перемещению производятся в соответствии с правилами формирования реализаций, изложенными в том же разделе.

4.1. Исследование адаптивного амортизатора при отключенной системе управления

В рассматриваемом режиме адаптивный амортизатор работает аналогично обычному гасителю колебаний. Следовательно, его испытания на стенде при отсутствии управляющего тока будут происходить следующим образом. Из ансамбля вызывается реализация функции перемещения, которую система управления стендом с помощью ЦАП подает для управления цилиндром. Процесс управления при этом происходит так, как описано в подразд. 3.3.

Все результаты измерения, записанные с датчиков, сохраняются для дальнейшей обработки. Параллельно идет контроль показаний датчика температуры. Если в какой-то момент времени температура жидкости превысила 150° , испытания останавливаются и осуществляется охлаждение амортизатора.

Когда номер гармонической функции изменяется, описанный выше процесс повторяется. Количество таких циклов испытаний – 40.

4.2. Исследование адаптивного амортизатора при постоянном управляющем сигнале

Для исследования зависимости характеристик адаптивного амортизатора от величины управляющего тока катушка электромагнита подключается к электронному блоку управления. В результате этого в дросселе возникает магнитное поле, воздействие которого изменит пропускную способность его канала. Так как величина тока в процессе одной итерации испытаний остается постоянной, данный режим будет идентичным описанному в подразд. 4.1. Величина тока будет последовательно изменяться от 0,5 до 10 А с приращением на каждом следующем режиме управления на $\Delta U_{\text{упр}}$ В.

4.3. Исследование адаптивного амортизатора при переменном управляющем сигнале

Испытания проводятся на стенде, у которого вместо неподвижной балочки установлена подпружиненная масса. К этой массе с помощью шаровой опоры подсоединен адаптивный амортизатор. Подпружиненная масса установлена в вертикальной направляющей, по которой она скользит в процессе колебаний. На рис. 3 показана фотография стенда, имитирующего процесс колебаний подпружиненной массы с использованием адаптивного амортизатора, управляемого с помощью ЭБУ. При проведении испытаний на таком стенде исследуется работа системы управления, отрабатывается алгоритм управления.



Рис. 3. Снимок стенда для испытания адаптивной подвески, нагруженной подпружиненной массой

Заключение

Процесс доводки адаптивных амортизаторов до использования их в промышленных образцах автомобильной техники весьма сложный и трудоемкий. В настоящей работе приведен опыт использования авторами работы результатов стендовых испытаний амортизаторов в процессе их проектирования.

Исследование включает в себя подготовку к испытаниям стендового оборудования, моделирование ансамбля реализаций для управления работой стенда и исследование адаптивного амортизатора при различных уровнях управляющего сигнала. Полученная в процессе стендовых испытаний информация о функциях перемещения, силах сопротивления, скоростях перемещения штока амортизатора, температурах и давлениях жидкости в управляемом дросселе позволила вычислить важные динамические свойства объекта испытания, такие как собственная частота колебания, коэффициент демпфирования, фазовый спектр, рабочая диаграмма и характеристика, которые были использованы как база знаний при разработке алгоритма управления магнитным полем адаптивного амортизатора. Испытания амортизатора при пере-

менном управлении позволяют доработать алгоритм управления и подготовить элементы системы поддрессирования к установке на экспериментальный автомобиль для проведения дорожных испытаний.

Работа будет полезной для специалистов, занимающихся разработкой и исследованием управляемых систем поддрессирования, а также демпфированием вынужденных колебаний различных конструкций.

Список литературы

1. Жданов, А.А. AdCAS – система автономного адаптивного управления активной подвеской автомобиля / А.А. Жданов, Д.Б. Липкевич // Труды Института системного программирования РАН. – 2004. – Т. 7. – С. 119–160.
2. Пневмоподвеска Mercedes Benz ML/GL. Общее описание, рекомендации по эксплуатации, слабые места пневматической подвески [Электронный ресурс] // Сообщество машин и людей. – Дата доступа : 03.09.2015. – Режим доступа : <http://www.drive2.ru/b/624689/>.
3. In Depth: Lexus RC 350 F Sport – what’s in it? Part F SPORT: Adaptive Variable Suspension [Electronic resource]. – ForceGT Australi. – Date of access : 01.09.2015. – Mode of access : <http://www.forcegt.com/news/in-depth-lexus-rc-350-f-sport-whats-in-it/>.
4. Volkswagen DCC Adaptive Chassis Control – Design and Function [Electronic resource]. – Date of access : 02.09.2015. – Mode of access : <http://www.my-gti.com/2653/volkswagen-dcc-adaptive-chassis-control-design-and-function>.
5. CDC – Continuous Damping Control // Kraftfahrzeugtechnik aus erster Hand [Electronic resource]. – Date of access : 03.09.2015. – Mode of access : http://www.kfztech.de/kfztechnik/fahrwerk/federung/cdc_continuous_damping_ccontro.htm.
6. Electronic Damper Control (EDC) // The international BMW website [Electronic resource]. – Date of access : 03.09.2015. – Mode of access : http://www.bmw.com/en/insights/technology/technology_guide/artecles/electronic_damper_control.html?source=categories&article=electronic_damper_control.
7. Land vehicles and systems with controllable suspension systems : пат. US 8,700,260 B2, B60G23/00; B62K25/00 / J.R. Mark, M.R. Lane, N.A. Mark ; заявитель LORD Corporation (Cary, NC, US); 13/262384 ; заявл. 03.30.10 // PCT Pub. No. WO2010/117762. – Oct. 14. 2010.
8. Кончак, В.С. Методика подготовки исходных данных для разработки динамических моделей автомобильных конструкций / В.С. Кончак, С.В. Хитриков, С.П. Лазакович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 1. – С. 60–68.
9. Кончак, В.С. Верификация компьютерных моделей механических конструкций с использованием результатов эксперимента / В.С. Кончак, А.А. Назаренко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 3. – С. 35–45.
10. Амортизаторы гидравлические телескопические. Технические требования и методы испытаний : ГОСТ Р 53816–2010. – Введ. 07.07.14. – М. : ФГУП «Стандартинформ», 2010. – 17 с.

Поступила 31.05.2017

¹Объединенный институт
машиностроения НАН Беларуси,
Минск, ул. Академическая, 12
e-mail: bats@ncrptm.bas-net.by

²ОАО «Минский завод колесных тягачей»,
Минск, пр. Партизанский, 150
e-mail: ugk@mzkt.by

**V.S. Konchak, S.V. Hitrikov, D.A. Shvets, Y.A. Bahdanau,
J.I. Nikolaev, V.L. Efremov**

**THE TECHNIQUE OF RESEARCH OF THE DEMPPING PROPERTIES OF THE
ADAPTIVE AMORTIZOR WITH THE CONTROLLING THROTTLE**

The research of the designed sample of the adaptive shock absorber, designed for the use in the systems of cushioning of trucks operating in off-road conditions is considered. The test scheme and the equipment used for their testing are given. Methods for controlling the accuracy characteristics of the measuring and control equipment, modeling control processes for obtaining the characteristics of the test sample are considered. The methods and program of testing procedure are given.