

В.В. ПИЛИПЕНКО, О.В. ПИЛИПЕНКО, Л.Г. ЗАПОЛЬСКИЙ

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ с КВАЗИНУЛЕВОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

Представлены основные результаты, полученные в Институте технической механики НАН Украины и НКА Украины при разработке и создании принципиально новых пневматических подвесок автомобилей и подвесок сиденья водителей транспортных средств различного назначения с пневматическими виброзащитными элементами.

The basic results obtained at the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine in the development of radically new car pneumatic suspensions and driver's seat suspensions for vehicles of different purposes with pneumatic vibration protection elements are presented.

Введение. Уровень виброзащиты – один из основных показателей качества, надежности и комфортабельности транспортных средств. Для защиты от динамических нагрузок широко используются различные виброзащитные системы с использованием металлических упругих элементов. Важнейшими характеристиками виброзащитных систем есть собственная частота колебаний и несущая способность. Качество виброзащиты существенно повышается по мере снижения собственной частоты колебаний защищаемого объекта. Одним из радикальных способов значительного снижения частоты собственных колебаний защищаемого объекта с сохранением необходимой несущей способности является пневматическая виброзащитная система с квазинулевой жесткостью, в которой решено противоречие между несущей способностью и жесткостью упругого элемента.

С середины 80-х годов подвеска автомобиля с металлическими упругими элементами начала вытесняться пневмоподвеской, позволяющей изменять жесткость подвески, регулировать дорожный просвет автомобиля и эффективно гасить колебания, передаваемые от дороги на кузов автомобиля. Ведущие мировые автопроизводители в настоящее время начинают применять адаптивную пневматическую подвеску на дорогах легковых автомобилях премиум- и бизнес-класса, а также на многих моделях внедорожников. При этом высокая стоимость такой подвески есть плата за существенное улучшение эксплуатационных характеристик автомобиля и комфорта езды [1].

Разработка простых и эффективных конструкций автономной пневматической подвески, обеспечивающей существенное улучшение ходовых характеристик, комфорт при езде и долговечность эксплуатации для широкого класса автомобилей малых и средних классов, входит в число важнейших проблем современного автомобилестроения.

Другой серьезной проблемой является защита от вибрации водителей транспортных средств, долгое время находящихся за рулем. Эта проблема может быть решена путем установки между креслом водителя и полом транспортного средства специальной виброзащитной системы – подвески сиденья водителя, которая может включать как металлические, так и пневматические упругие элементы.

Современные конструкции пневматических виброзащитных систем подвесок кресла водителя, отвечающие требованиям санитарных норм, имеют элементы автоматики, требуют наличия пневмосистемы высокого давления, а также демпфирующего устройства – амортизатора. Такие системы дорого-

© В.В. Пилипенко, О.В. Пилипенко, Л.Г. Запольский, 2008

стоящи в изготовлении, сложны в обслуживании и требуют при изготовлении высокоточных и специальных производств.

Поэтому разработка такой системы виброзащиты водителя, которая при невысокой стоимости обладает улучшенными, по сравнению с существующими, статическими и динамическими характеристиками и, в то же время, проста в изготовлении и эксплуатации, является весьма актуальной задачей.

Пневматические подвески с квазиулевым жесткостью для легковых автомобилей. Имеющийся опыт по созданию пневматических подвесок для класса особо малых автомобилей семейства «Таврия» был использован в продолжение разработки теоретических и методологических основ создания принципиально нового класса пневматических подвесок для легковых автомобилей различных классов.

Создание конструкций пневматической подвески для автомобиля «Таврия» с несущей способностью 190 – 270 кг выявило возможность организации такого неравновесного рабочего процесса в воздушных полостях подвесок, который обеспечивает необходимое рассеивание колебательной энергии и позволяет отказаться от установки специального гидравлического амортизатора.

Неравновесный рабочий процесс в воздушных полостях и сравнительно небольшая сила сухого трения в предложенных конструкциях пневматических подвесок для автомобиля «Таврия» позволили в дальнейшем разработать конструкцию пневматической подвески с раздельным гашением низкочастотных колебаний подрессоренной массы и высокочастотных колебаний неподдресоренной массы.

При создании конструкций таких подвесок для переднеприводных автомобилей семейства ВАЗ было предложено использовать динамический гаситель колебаний, встроенный в конструкции подвесок и позволяющий обеспечить эффективное сцепление колес с дорогой при движении автомобиля по дорогам с разными видами покрытий.

В основу разработки автономной пневматической подвески с динамическим гасителем колебаний были положены принципы раздельного гашения низкочастотных и высокочастотных колебаний для обеспечения требуемых упругих и демпфирующих свойств системы.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили возможность создания принципиально новой пневматической подвески автомобиля с квазиулевым жесткостью и раздельным гашением низкочастотных и высокочастотных колебаний подрессоренной и неподдресоренной масс автомобиля без применения гидравлического амортизатора. Переход от квазиулевого жесткости к большой осуществляется плавно, без резких изменений ее величины, вследствие чего плавность хода автомобиля существенно повышается.

Для реализации этих принципов в конструкциях подвесок для различных марок автомобилей были разработаны линейная (с применением метода гармонической линеаризации основных нелинейностей), а затем и нелинейная математические модели пневматической подвески с раздельным гашением низкочастотных и высокочастотных колебаний.

Разработанные математические модели позволяют проводить расчетный анализ динамических свойств подвески автомобиля и расчетным путем определить ее основные статические и динамические характеристики и оптимизировать конструктивные параметры. Разработан подход, позволяющий на ос-

нове математической модели проводить анализ качества подвесок (ходовой части автомобиля) по основным показателям – сцепляемости с дорогой, жесткости езды и фазовому углу динамической составляющей нагрузки.

На основе полученных данных были разработаны математические модели вертикальных колебаний автомобиля с подвесками разных типов, которые позволяют прогнозировать поведение автомобиля на дороге и выдавать практические рекомендации по выбору конструктивных и режимных параметров высокоэффективных подвесок применительно к разным типам легковых автомобилей.

Для оценки эффективности пневматической подвески с динамическим гасителем колебаний применительно к автомобилю ВАЗ-21099 выполнено моделирование линейной динамики системы "кузов автомобиля – подвеска – колесо" и определены основные динамические характеристики системы. Разработаны методики анализа эффективности конструкции подвески, и выданы практические рекомендации по выбору оптимальных конструктивных параметров подвески и динамического гасителя колебаний.

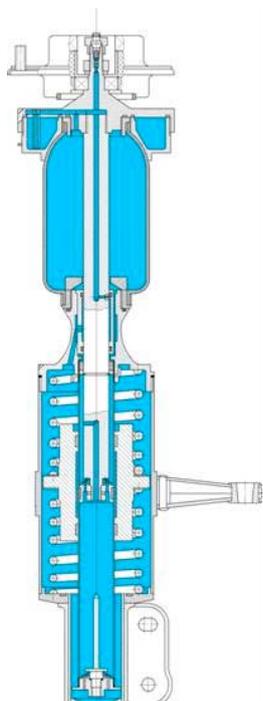


Рис. 1

Разработаны конструкции новых подвесок с раздельным гашением низкочастотных и высокочастотных колебаний для легковых автомобилей, изготовлены экспериментальные образцы передней и задней пневматических подвесок и проведены ходовые испытания автомобиля ВАЗ-21099 с этими подвесками.

Разработаны конструкции новых подвесок с раздельным гашением низкочастотных и высокочастотных колебаний для легковых автомобилей, изготовлены экспериментальные образцы передней и задней пневматических подвесок и проведены ходовые испытания автомобиля ВАЗ-21099 с этими подвесками.

Конструкция подвески не требует автономного компрессора с системой подготовки воздуха, обеспечивает постоянный дорожный просвет при любой загрузке автомобиля. Рабочие процессы в пневматической подвеске реализованы таким образом, что не требуется установка специального гидравлического амортизатора.

На рис. 1 представлен схематический разрез конструкции подвески, где голубым цветом показаны полости подвески, заполненные воздухом. На рис. 2 приведена фотография разработанных экспериментальных образцов пневматической подвески для передней и задней оси легковых автомобилей.

Проведенные исследования разработанных конструкций подвесок в стендовых условиях показали, что они по своим статическим и динамическим характеристикам существенно улучшают показатели штатной конструкции подвески.

В качестве примера на рис. 3 – 4 приведены основные характеристики конструкции подвески для передней оси автомобиля малого класса ВАЗ-21099 при минимальных и максимальных значениях величины нагрузки на подвеску.

Так, на рис. 3 представлены сравнительные статические характеристики передней подвески автомобиля ВАЗ-21099 со штатной подвеской



Рис. 2

(зависимость 1) и пневматической подвеской при максимальной нагрузке (зависимость 2) и минимальной нагрузке на подвеску (зависимость 3). На рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика передней подвески автомобиля ВАЗ-21099 при минимальной нагрузке со штатной подвеской (зависимость 1) и пневматической подвеской (зависимость 2).

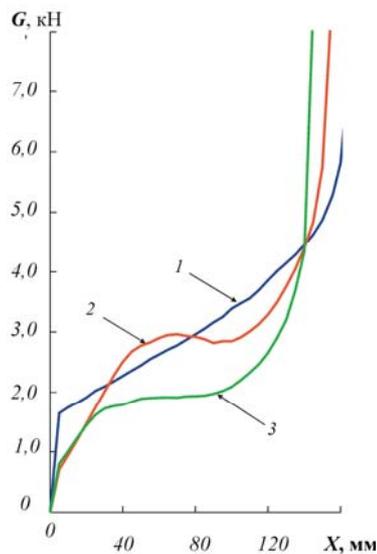


Рис. 3

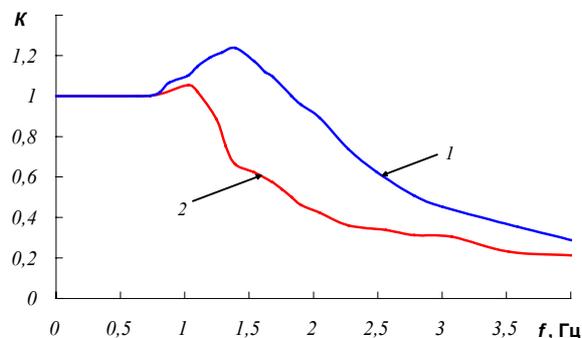


Рис. 4

В данных конструкциях пневматических подвесок обеспечено достаточное демпфирование низкочастотных колебаний поддресоренной массы автомобиля. Гашение колебаний начинается с частоты $\sim 1,1$ Гц.

Установка пневматических подвесок на серийный автомобиль взамен штатных конструкций подвески обеспечивает частоту собственных колебаний поддресоренной массы (кузова автомобиля) не более 0,8 Гц, при этом максимальный коэффициент усиления на резонансной частоте колебаний не превышает 1,3.

Исследования, проведенные на динамическом стенде проверки ходовой части автомобилей фирмы “Hoffman”, показали, что при оптимальных значениях параметров динамического гасителя колебаний достигается существенное демпфирование колебаний поддресоренной массы на частотах, близких к частоте высокочастотного резонанса системы, что выражается в высоких значениях сцепляемости автомобиля с дорогой и свидетельствует о высокой эффективности разработанной конструкции пневматической подвески.

На рис. 5 показаны расчетные зависимости спектральной плотности вертикальных виброускорений кузова автомобиля $S_{\ddot{z}_g}$ от частоты возмущающего воздействия со штатными (зависимость 2) и пневматическими (зависимость 1) подвесками при движении автомобиля по дорогам разных типов и с разным покрытием.

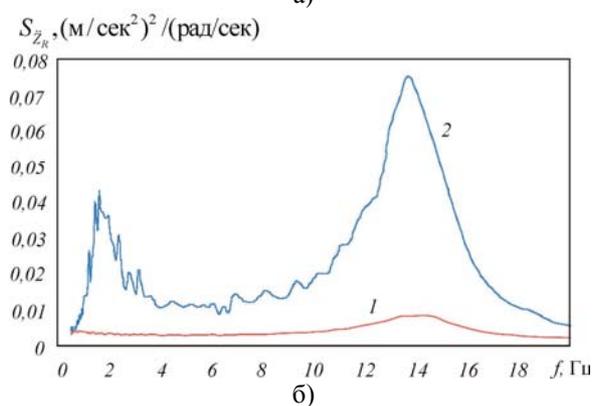
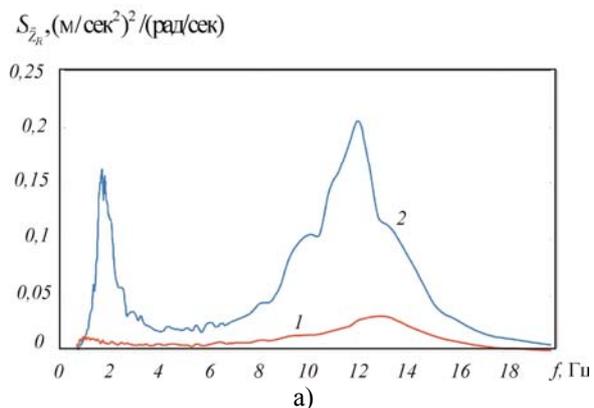


Рис.5

На рис. 5 а) приведены сравнительные зависимости σ_{z_g} при движении автомобиля со скоростью 45 км/ч по булыжно-асфальтовой дороге.

На рис. 5 б) приведены сравнительные зависимости σ_{z_g} при движении автомобиля со скоростью 120 км/ч по асфальтно-бетонной дороге.

Конструкция разработанной в институте пневматической подвески в сравнении со штатной конструкцией подвески обеспечивает существенное повышение ходовых и эксплуатационных характеристик серийного автомобиля. Оценка эффективности предложенных конструкций пневматических подвесок, проведенная по величинам среднеквадратичных ускорений кузова

и колес автомобиля при движении автомобиля по дорогам с разным покрытием, показала, что на дороге с асфальтобетонным покрытием разработанная пневматическая подвеска защищает кузов автомобиля в 2÷3 раза лучше в сравнении со штатной подвеской, а на булыжно-асфальтовых дорогах ее эффективность возрастает до 6 раз в сравнении со штатной подвеской. Также пневматическая подвеска снижает уровень виброускорений неподрессоренных масс автомобиля ~ в 2,5 раза по сравнению со штатной конструкцией при движении по булыжно-асфальтовой дороге.

Проведенный цикл расчетно-экспериментальных исследований и ходовые испытания серийного автомобиля ВА3-21099 с разработанными пневматическими подвесками показали их высокую эффективность, правильность выбора основных параметров конструкции подвесок и достоверность результатов, полученных на основании разработанных математических моделей.

По результатам экспериментальных исследований уточнены некоторые параметры математических моделей рабочих процессов в полостях подвесок и разработаны методики определения основных свойств пневматической подвески и методика определения профиля плунжера пневматической подвески [2 – 4].

Накопленный опыт разработки и исследования принципиально новых конструкций пневматических подвесок автомобилей позволил перейти к разработке нового класса подвесок – пневмогидравлических подвесок. Разработаны принципиальная схема и математическая модель автономной, авторегулируемой пневмогидравлической подвески для тяжелой колесной машины. Математическое моделирование рабочих процессов в такой подвеске с учетом параметров масляно-воздушной смеси в рабочих полостях подвески при

разном характере возмущающих воздействий со стороны дороги позволило расчетным путем определить оптимальные конструктивные и режимные параметры, необходимые для проектирования конструкции.

На основе полученных результатов была разработана и создана автономная пневмогидравлическая подвеска, которая обеспечивает несущую способность каждого элемента до 20 кН и низкую собственную частоту колебаний подрессоренной массы для тяжелых колесных машин, в частности для разведывательной машины «Дозор-Б» разработки Харьковского КБ им. Морозова. Указанная машина с установленными пневмогидравлическими подвесками успешно прошла ходовые испытания, при которых удалось существенно повысить скорость движения машины по искусственным неровностям полигона в сравнении с результатами испытаний при установке штатных подвесок с металлическими упругими элементами.

На рис. 6 приведены фотографии колесной машины «Дозор-Б» и конструкций пневмогидравлических подвесок для подрессоривания ее передней и задней осей.



Рис. 6

Пневматические виброзащитные системы для подвески сиденья водителей транспортных средств различного назначения. Основная задача научных исследований в этой области состоит в создании методологических основ разработки пневматических виброзащитных систем для сиденья водителя транспортных средств различного назначения, и на их основе разработке конструкции автономного пневматического виброзащитного модуля, пригодного для применения во многих областях промышленности для виброзащиты различных механических объектов.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали принципиальную возможность создания нового класса пневматических виброзащитных модулей с квазинулевой жесткостью на рабочем участке хода и прогрессивным изменением жесткости при ходе сжатия и отбоя. Также была установлена возможность организации такого неравновесного рабочего процесса в воздушных полостях виброзащитной системы, который обеспечивает необходимое рассеивание колебательной энергии и позволяет избавиться от установки гидравлического амортизатора с нелинейной и несимметричной зависимостью силы неупругой реакции от скорости относительного перемещения элементов виброзащитной системы. Неравновесный рабочий процесс в воздушных полостях виброзащитной системы и сравнительно небольшая сила сухого трения обеспечивают эффективное гашение низкочастотных колебаний виброзащищаемого объекта.

Разработана нелинейная математическая модель динамической системы "виброзащитный модуль – защищаемый объект". Эта модель в дальнейшем была усовершенствована для определения рациональных конструктивных параметров виброзащитных модулей для существенного снижения ускорений, которые передаются на виброзащищаемый объект.

Разработана методика определения основных свойств пневматической подвески, предложена обобщенная формула для выбора статической характеристики пневматической подвески для сиденья водителя транспортных средств и получены зависимости изменения эффективной площади резинокордной оболочки от перемещения подвески [3 – 4].

Предложена методика определения профиля плунжера для обеспечения требуемой зависимости изменения эффективной площади резинокордной оболочки и усилий, действующих на подвеску при ее перемещении. Это позволяет при разработке экспериментальных образцов виброзащитных модулей определить рациональные конструктивные параметры уже на этапе проектирования, что существенно уменьшает время, затраченное на разработку конструкции [4].

Для тракторов, выпускаемых Южным машиностроительным заводом, был разработан пневматический виброзащитный модуль кресла водителя с питанием от пневмосистемы трактора, который после автономного определения статических и динамических характеристик прошел Государственные испытания в составе трактора ЮМЗ-6АКЛ и получил Сертификат соответствия техническим условиям межгосударственного стандарта 20062 – 96. Как показали испытания, статические и динамические характеристики подвески сиденья с пневматическим виброзащитным модулем значительно превосходят характеристики существующих аналогов. Разработанная конструкция виброзащитного модуля при установке в подвеску сиденья водителя трактора обеспечивает рабочий ход подвески сиденья не менее 100 мм, сухое трение в элементах подвески не превышает 70 Н и снижение до 1,0 Гц частоты собственных колебаний подрессоренной массы.



Рис. 7

Общий вид подвески сиденья водителя с разработанной конструкцией виброзащитного модуля приведен на рис. 7.



Рис. 8



Рис. 9

В дальнейшем была разработана конструкция и изготовлены экспериментальные образцы автономного виброзащитного модуля, который не требовал подключения к пневмосистемам транспортного средства, а имел собственный встроенный

компрессор, работающий с использованием энергии колебаний корпуса транспортного средства при езде. Автономный виброзащитный модуль (АВЗМ) функционирует за счет энергии колебаний, передающихся на нижнюю платформу сиденья водителя от корпуса транспортного средства при его движении. Автоматическое поддержание заданного рабочего уровня кресла происходит за счет изменения давления в рабочей полости АВЗМ и изменения эффективной площади его резинокордного эластичного силового элемента. Рассеивание энергии колебаний осуществляется за счет перетекания масловоздушной смеси через калиброванные отверстия, соединяющие полости подвески.

Далее были разработаны варианты конструкции автономной системы виброзащиты сиденья водителя транспортного средства для использования на различных типах транспортных средств. Основные технические решения в конструкциях подвесок сиденья транспортного средства с пневматическими виброзащитными модулями защищены патентами Украины [5 – 7].

На рис. 7 – 9 представлены фотографии вариантов конструкций виброзащитных модулей в составе подвески сиденья водителя транспортного средства: на рис.7 – конструкция ТМ0156 с питанием от пневмосистемы транспортного средства; на рис.8 – конструкция с автономным виброзащитным модулем АЗ-ПМ, имеющим встроенный компрессор; на рис. 9 – конструкция В6.00.00.00 автономного виброзащитного модуля с дополнительной воздушной полостью изменяемого объема.

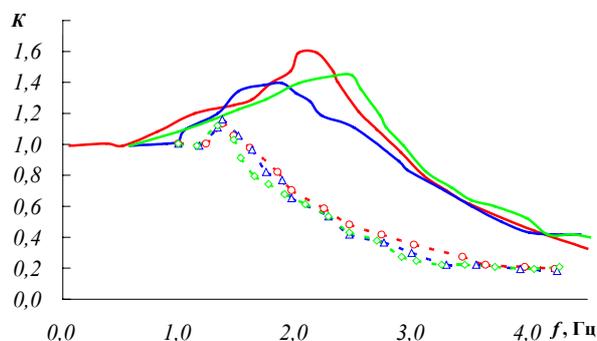


Рис. 10

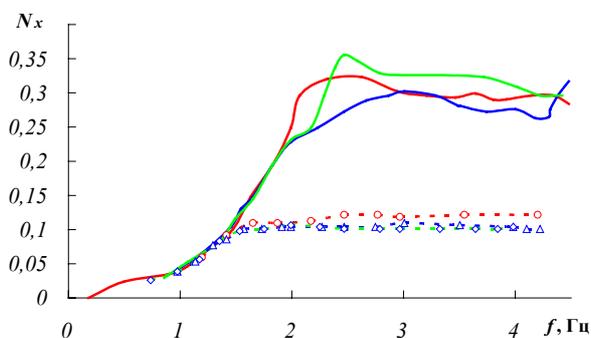


Рис. 11

Проведенный цикл расчетно-экспериментальных исследований разработанных конструкций пневматических систем виброзащиты в составе кресла водителя транспортного средства определил их статические и динамические характеристики в зависимости от конструктивных и режимных параметров виброзащитного модуля.

В качестве примера на рис. 10 представлены сравнительные динамические характеристики сидений водителя трактора с металлическими упругими элементами (сплошные линии) и разработанным пневматическим виброзащитным модулем (пунктирные линии с маркерами). На рис. 11 показаны сравнительные характеристики изменения уровня виброперегрузок от частоты возмущающего воздействия, действующего на водителя через сиденье с металлическими упругими элементами (сплошные линии) и сиденье с пневматической виброзащитной системой (пунктирные линии с маркерами). На обоих рисунках зеленый цвет линии соответствует нагрузке на подвеску 450 Н, синий цвет линии – нагрузке на подвеску 600 Н и красный цвет линии – нагрузке на подвеску 900 Н. Экспериментально показано, что разработанные конструкции обеспечивают снижение восприятия водителя к колебаниям в ~ 3 раза в сравнении с лучшими мировыми аналогами.



Рис. 12

В настоящее время разработанные конструкции подвесок сиденья водителя с пневматическими виброзащитными модулями (рис.12) устанавливаются на городских автобусах «Богдан», на тракторах производства ГП ПО ЮМЗ, тракторах «Белорус» украинской сборки (ОАО «Укравтозапчасть») и на тракторах «Ярило» производства Симферопольского автозавода.

1. Hirohisa T. Активная подвеска легковых автомобилей / Т. Hirohisa, Т. Toshiharu // Юацу то кукиацу=J.Jap. Hudrau. And Pneum. Soc. –1990. – Т. 21, № 2. – С. 120 –125. – Яп.
2. Пилипенко М. В. Пайдем Р. А. Методика определения основных свойств пневматической подвески по результатам статических испытаний / М. В. Пилипенко, Р. А. Пайдем // Техническая механика. – 2005. – №2. – С. 148 – 153.
3. Пилипенко М. В. Определение основных свойств пневматической подвески // Техническая механика. – 2006. – №1. – С. 171 – 185.
4. Пилипенко М. В. Методика определения профиля плунжера пневматической подвески / М. В. Пилипенко // Техническая механика. – 2006. – № 2. – С. 158 – 166.
5. Патент на винахід № 64036 Україна МПК В60N 2/50, В60N 2/02. Підвіска сидіння транспортного засобу / Пилипенко В. В., Пилипенко О. В. ; власник Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – 2002076132 ; заявл. 23.07.2002 ; опубл. 16.02.2004.
6. Патент на винахід № 74313 Україна. МПК В60N 2/50. Підвіска сидіння транспортного засобу / Пилипенко В. В., Пилипенко О. В., Пилипенко М. В. ; власник Товариство з обмеженою відповідальністю, Науково-виробниче підприємство «Віброзахист». – а200503442 ; заявл. 12.04.2005 ; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11.
7. Патент на винахід № 76685 Україна. МПК В60N 2/50. Підвіска сидіння транспортного засобу / Пилипенко В. В., Пилипенко О. В., Пилипенко М. В. ; власник Товариство з обмеженою відповідальністю, Науково-виробниче підприємство «Віброзахист». – а200600240 ; заявл. 10.01.2006 ; опубл. 15.08.2006, Бюл. № 8.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 11.10.08,
в окончательном варианте 22.10.08