

УДК: 62-27 : 62-219.5

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КЛАССИФИКАЦИЯ УПРУГИХ
УСТРОЙСТВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТРАДИЦИОННЫХ И НОВЫХ
ПОДВЕСКАХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова»
Email: 8888nike8888@mail.ru

Упругие устройства являются составной частью конструкции подвесок колесных машин и в значительной мере определяют эксплуатационные свойства последних. В данном случае под колесными машинами рассматриваем автомобили, колесные тракторы, скреперы и другую колесную технику, несущие системы которых соединены с колесами с помощью упругих подвесок. В общем случае упругие устройства включают в себя упругий элемент, а также детали и узлы, с помощью которых эти устройства монтируются в подвесках колесных машин. Теория проектирования и длительная практика использования подвесок для различных типов автомобилей и других колесных машин достаточно полно представлена в многочисленных литературных источниках [1-3 и др.]. В то же время, несмотря на отдельные прогрессивные технические решения и достаточно глубокие, но разрозненные теоретические обоснования, конструкции современных упругих устройств подвесок все еще далеки от совершенства. В частности отсутствуют современная классификация и полная номенклатура упругих устройств для подвесок колесных машин, обоснованные рекомендации по рациональному применению с учетом особенностей условий эксплуатации таких устройств, а также сравнительная оценка эффективности их применения.

К упругим устройствам подвесок колесных машин предъявляются жесткие и противоречивые требования, что существенно затрудняет обоснование и оптимизацию параметров их конструкций. Основными из таких требований являются: высокие удельные жесткость и энергоемкость рабочего тела, надежность, стабильность рабочих параметров и возможность пассивного и(или) активного управления ими, низкая инерционность срабатывания, компактность, удобство компонования на машине и технического обслуживания, использование дефицитных материалов, сложности технологии изготовления и приемлемой стоимости при массовом производстве [4].

История появления и создания упругих элементов и устройств для подвесок колесных транспортных средств насчитывает уже не одну тысячу лет. Артефакты и многочисленные сохранившиеся древние письмены свидетельствуют, что еще до появления колеса в Месопотамии (2000 лет до н. э.) применялись примитивные устройства в виде упругих волокуш, полозьев и носилок-гопаков. Для этой цели вначале использовались доступные материалы в основном из шкур животных и материалов из древесины гибких пород (бамбук, акация, ива, вяз, кипарис и др.). Появление одноосных телег с колесами, изготовленными из камня, а затем из сплошной древесины и приводимых в движение мускульной силой человека, позволило перевозить более тяжелые грузы, но сам процесс оставался трудоемким.

С началом эпохи широкого использования тяги прирученных животных (лошадей, оленей, быков и др.) и соответственно увеличением скорости движения одноосных и двухосных колесниц возникла естественная необходимость смягчения воздействующих на них толчков при движении по недостаточно обустроенным дорогам. Для уменьшения массы колеса их стали изготавливать по классической схеме «ступица-спицы-обод». Попытки использовать изогнутые в плоскости вращения колеса спицы из упругой древесины для создания эффекта амортизации не получили в то время дальнейшего развития из-за сложности изготовления, низкой надежности и недостаточной эффективности. Поэтому следующим прогрессивным шагом создания подвесок для колесных экипажей было появление в XV веке конструкции, в которой крепление пассажирской люльки осуществлялось к загнутым концам рамы с помощью четырех кожаных ремней. В 1804 году английский каретный мастер О. Эллиот изобрел горизонтальные эллиптические рессоры. Это позволило избавить экипаж от резких толчков, убрать громоздкую конструкцию, на которой крепились ремни и С-образные рессоры. В результате экипажи приобрели легкость и изящество, что способствовало появлению разнообразных колясок (фаэтон, кабриолет, шарабан, дрожки, ландо, пролетки, линейки) и стало близким прообразом современных автомобилей [5].

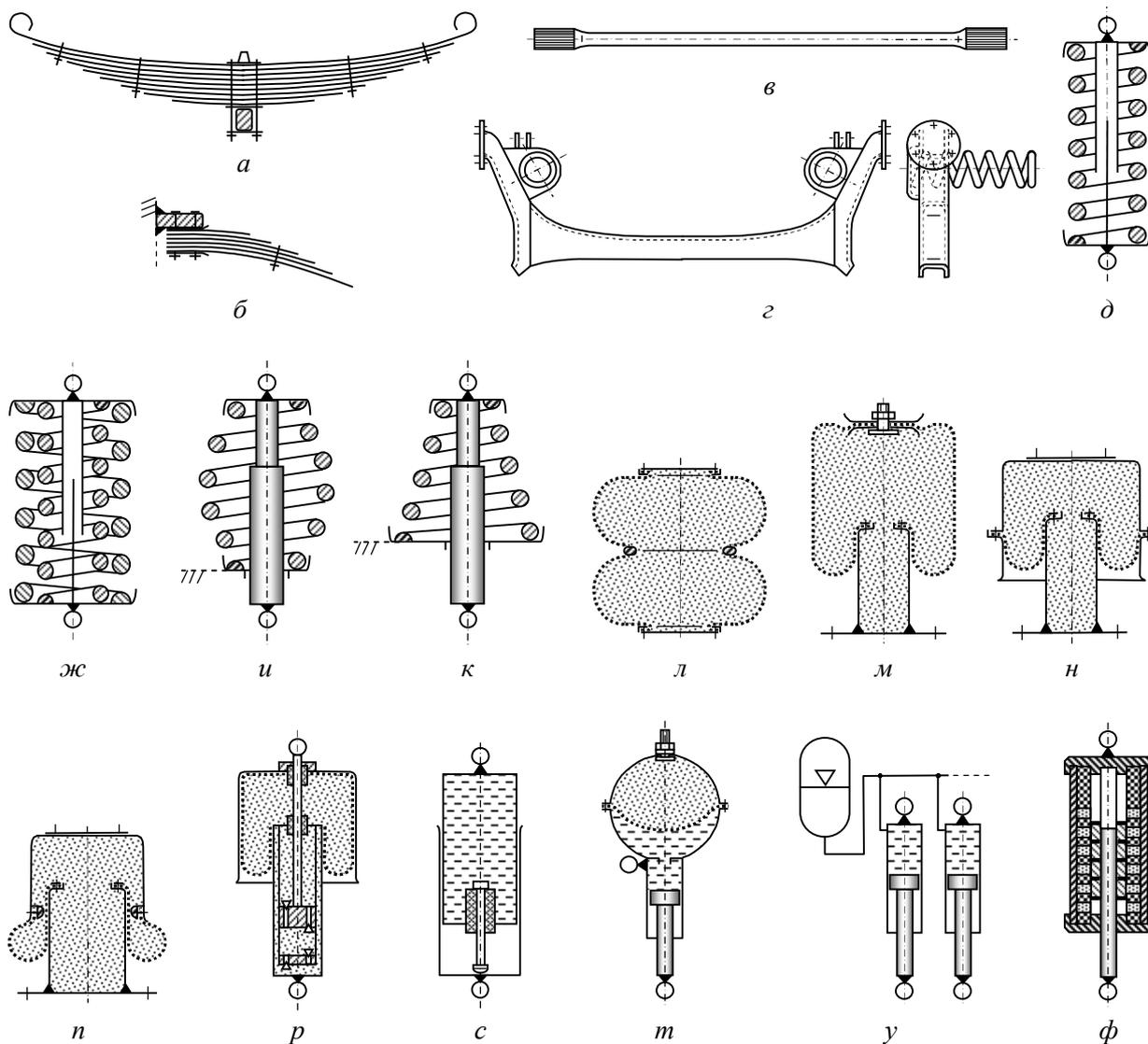
К настоящему времени отечественные и зарубежные производители в подвесках автотракторной колесной техники используют достаточно широкую номенклатуру упругих устройств, разных по конструкции и техническим характеристикам (рис. 1). Представленные схемы конструкций упругих устройств обеспечивают оснащение ими подвесок для всех типов автомобилей и другой

колесной техники. Они апробированы в условиях длительной эксплуатации в реальных условиях и в целом обеспечивают надежную работу подвесок колесных машин, как при движении по дорогам с твердым покрытием, так и по грунтовым дорогам и бездорожью. Для зависимых подвесок чаще используют рессоры и торсионы (рис. 1, *a ... z*), а для независимых – спиральные пружины, торсионы, пневмобаллоны и другие упругие устройства (рис. 1, *д ... ф*).

Основным рабочим параметром упругого элемента принято считать его силовую характеристику $P = f(x)$, т. е. зависимость усилия P , прикладываемого к упругому элементу, от величины его деформации x (рис. 2). При этом следует различать индивидуальную силовую характеристику упругого устройства от упругой характеристики упругой подвески колесной машины, в которой установлено это упругое устройство. Основное отличие заключается в том, что силовая характеристика упругого устройства определяется лишь его зависимостью $P = f(x)$, тогда как упругая характеристика подвески существенно зависит от принятой кинематической схемы размещения в ней упругого устройства и, соответственно, влияния дополнительных звеньев (рычагов, шарниров и т. п.). Силовые характеристики упругих устройств характеризуются зависимостями, представленными следующими основными кривыми графика на рисунке 2: простыми функциями – линейной (кривая 1), вогнутой (кривая 2), выпуклой (кривая 3) и сложными функциями (кривые 4 и 5). При этом если простые зависимости (кривые 1-3) детерминированы и определяются в основном лишь естественной силовой характеристикой упругого устройства, то сложные зависимости формируются целенаправленно с помощью управляемых систем, которыми оснащаются эти устройства. Площади под кривыми силовых характеристик упругих устройств определяют в конечном итоге динамическую энергоемкость соответствующих подвесок и, следовательно, эффективность их упругих элементов [6].

С целью сравнительной оценки эффективности представленных на рисунке 1 схем упругих устройств подвесок колесных машин, кратко рассмотрим основные преимущества и недостатки каждого из них, которые важно учитывать при проектировании, изготовлении и эксплуатации колесных машин.

Наибольшее распространение в подвесках колесных машин получили традиционные конструкции упругих устройств в виде рессор, состоящих из стальных цельных листов (рис. 1, *a*) или реже усеченных (рис. 1, *б*) и скрепленных хомутами. Количество листов в рессоре может варьироваться от одного до восьми и более. Коренные листы имеют наибольшую длину и оснащены узлами



а, б – рессорные листовые цельная и усеченная; *в, г* – торсионные стержневой и балочный, совмещенный с пружиной; *д, ж* – пружинные цилиндрические одинарная и двояная;

и, к – пружинные бочкообразная и коническая со встроенными амортизаторами; *л, м* – пневмобаллонные секционный и рукавный; *н, п* – пневматические диафрагменные с направляющей и без направляющей поверхностями; *р* – пневматическое со встроенным амортизатором; *с* – гидравлическое плунжерное; *т, у* – пневмогидравлические автономный и групповой; *ф* – электромагнитное

Рисунок 1 – Схемы основных типов упругих устройств, используемых в подвесках колесных машин

крепления к раме или кузову машины. Рессоры устанавливаются преимущественно вдоль рамы машины и по способу заделки и форме могут быть полуэллиптическими, кантилеверными или четвертными. В грузовых автомобилях повышенной грузоподъемности кроме основных рессор применяются дополни-

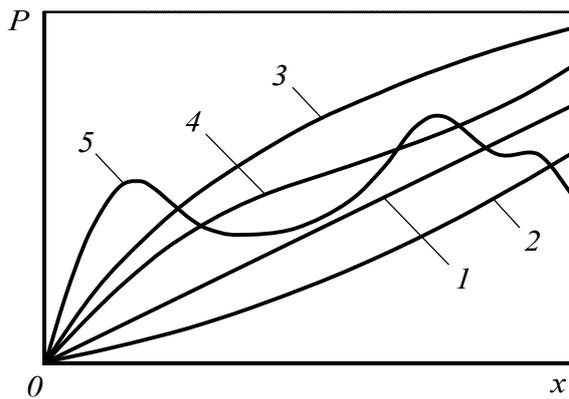


Рисунок 2 – Основные виды зависимостей усилий P от величины деформации x упругих элементов, используемых в подвесках колесных машин

тельные рессоры, обеспечивающие подвескам оптимальную упругую характеристику во всем диапазоне нагрузок [7]. Силовые характеристики одиночных рессор примерно соответствуют выпуклой кривой 3 на рисунке 2, а сдвоенных рессор – кривой 4. Основным достоинством листовых рессор является их способность совмещать функции упругого, направляющего, гасящего и стабилизирующего устройств подвески. Кроме этого они просты в изготовлении и доступ-

ны для технического обслуживания и ремонта. К недостаткам листовых рессор следует отнести их увеличенные размеры, высокую металлоемкость, недостаточные энергоемкость и надежность, к тому же их применение ограничено лишь зависимыми подвесками.

Торсионные упругие устройства используются в подвесках практически всех типов колесных машин. Работающие на кручение стальные торсионы круглого сечения могут быть одно (рис. 1, в), многостержневыми, а также составными. Торсионы выполняются в виде пластин, балочных конструкций, в том числе совмещенных с пружинами (рис. 1, з). Они используются в зависимых и в независимых подвесках, так как могут располагаться как вдоль, так и поперек рамы или кузова машины. Силовая характеристика торсионов соответствует линейной зависимости (кривая 1 на рис. 2). К достоинствам торсионов следует отнести их компактность и большую, чем у рессор удельную энергоемкость. В то же время торсионы обладают рядом недостатков, ограничивающих их широкое применение в подвесках колесных машин. К ним относятся невысокая долговечность, а также необходимость иметь автономное направляющее устройство, усложняющее конструкцию и повышающее металлоемкость подвески в целом [8].

Широкое применение в подвесках колесных машин нашли упругие устройства, состоящие из спиральных цилиндрических пружин одинарных (рис. 1, д), сдвоенных (рис. 1, ж), бочкообразных (рис. 1, и) и конических (рис. 1, к). Они устанавливаются в зависимых и независимых подвесках на передних, а в легковых автомобилях и на задних колесах. Силовая характеристика цилиндрических пружин близка к линейной зависимости (кривая 1 на рис. 2), а фигурных

пружин – к вогнутой (кривая 2), что вполне обеспечивает необходимые динамические параметры подвескам. Пружины обладают высокой удельной энергоемкостью, просты в изготовлении и обслуживании, долговечны и имеют небольшую массу. Кроме этого пружины хорошо komponуются в конструкциях подвесок соосно амортизатору или стойке, либо между рычагом и кузовом.

Основными недостатками упругих пружинных устройств являются следующие: они воспринимают только вертикальные нагрузки и не могут передавать продольные и поперечные усилия на раму и кузов машины; усложнение конструкции подвески из-за необходимости иметь автономные направляющие устройства; обязательность использования гасящих устройствах (амортизаторов), так как в пружинах, в отличие от рессор, отсутствуют пары трения [9].

Большую группу упругих устройств, отличающихся большим разнообразием конструкций и получивших в последние годы большое применение в подвесках колесных машин, представляют устройства, в которых упругими элементами являются пневматические секционные (рис. 1, л) и рукавные баллоны (рис. 1, м), а также пневматические с диафрагмами (рис. 1, н ... р). Такие упругие устройства целесообразно применять на колесных машинах, масса подрессоренной части которых меняется в широких пределах (грузовые автомобили), или требования к плавности хода которых высоки (автобусы, троллейбусы и др.). Баллоны изготавливаются из резинокордовых или полимерных армированных материалов, обладающих хорошими упругими свойствами, а также прочностью и долговечностью. Корд выполняется многослойным с диагональным размещением синтетических нитей (нейлон, капрон и т. п.). Толщина оболочки составляет 3-6 мм, причем наружный ее слой изготавливается из маслобензостойких, а внутренний – из воздухонепроницаемых материалов. Пневмобаллоны тороидальной формы бывают одно и многосекционными (диафрагменными) и герметично монтируются между опорными фланцами, а между секциями для усиления установлены стальные кольцевые бандажы. Максимальное давление в рукавном пневмобаллоне не превышает 0,8, а рабочее – 0,3-0,5 МПа, причем минимальное давление, как правило, не ограничивается, а в качестве ограничителя хода используются внешние или внутренние буфера из резины. В диафрагменных пневмобаллонах рабочее давление выше и составляет в среднем 0,7-1,5 МПа. От механических повреждений рукавные пневмобаллоны защищают металлические кожуха, которые могут одновременно выполнять роль наружных направляющих поверхностей для баллонов (рис. 1, н ... р). В ряде

конструкций пневмобаллонных упругих устройств соосно внутри баллонов устанавливают пневматические (рис. 1, *p*) или пневмогидравлические амортизаторы, что делает конструкцию подвески в целом более компактной [10].

У пневмобаллонных упругих устройств усилие при ходе на сжатие растет, так как увеличивается внутреннее давление и, следовательно, жесткость, поэтому для достижения низкой частоты собственных колебаний необходимо предусматривать дополнительные резервуары в корпусах устройств (рис. 1, *m ... p*). Диафрагменные пневмобаллоны обеспечивают низкую частоту колебаний при меньшем объеме воздуха. В связи с этим существенным преимуществом пневмобаллонных упругих устройств является возможность ручного или автоматического управления изменением давления воздуха в баллоне и таким образом регулировать жесткость подвески. При этом достаточно легко обеспечивается регулирование высоты пола (автобуса), грузовой платформы или прицепного устройства колесной машины относительно опорной поверхности, а также величины дорожного просвета. Благодаря имеющейся возможности регулирования жесткости силовые характеристики пневмобаллонных упругих устройств могут варьироваться в широких пределах от вогнутой до выпуклой (кривые 1 и 2 на рис. 2). Это позволяет повысить эффективность подвесок колесных машин по сравнению с подвесками, оснащенных традиционными (рис. 1, *a ... к*) типами упругих устройств [11]. В зависимости от грузоподъемности на колесные машины могут устанавливаться от одного до четырех пневматических упругих устройств, как на зависимых, так и на независимых подвесках.

Основными недостатками пневматических упругих устройств являются: относительная сложность конструкции и обслуживания в эксплуатации, повышенные габаритные размеры, отсутствие направляющих устройств для передачи продольных и поперечных сил от колес к кузову, необходимость установки амортизаторов.

В настоящее время ряд производителей автотракторной техники ведут интенсивные исследования по разработке новых упругих устройств для подвесок колесных машин, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами (рис. 1, *с ... ф*). Представляет интерес конструкция гидравлического упругого устройства (жидкостной «пружины»), которое работает на принципе сжатия специальной (силиконовой) жидкости, сжимаемость которой примерно вдвое выше сжимаемости дистиллированной воды. По данным исследователей сжимаемость дегазированной силиконовой жидкости составляет примерно 0,6-

0,8 % на каждые 10 МПа повышения давления [12].

Упругое устройство состоит из толстостенного рабочего цилиндра, изготовленного из высокопрочной стали, крышки с подвижным штоком, который охватывает уплотнение особой конструкции, обеспечивающее необходимую герметичность подвижного соединения при максимальном давлении рабочей жидкости, достигающее 70-100 МПа. Для разгрузки плунжера от боковых нагрузок наружный его конец выполнен полусферой, с помощью которой он опирается на днище направляющего стакана, свободно перемещающегося вдоль рабочего цилиндра. Крутизна упругой характеристики такой жидкостной «пружины» примерно соответствует кривой 3 на рисунке 2 и зависит от объема сжимаемой жидкости, диаметра и хода штока. Вследствие небольшого хода штока такое упругое устройство устанавливается в подвеску колесной машины с помощью промежуточных звеньев, что несколько усложняет конструкцию и увеличивает габаритные размеры подвески [13, 14].

К преимуществам упругого устройства, выполненного на основе жидкостной «пружины», можно отнести его относительно небольшие габариты и массу, а также удобство компонования в подвеске. Недостатками устройства, над устранением которых работают разработчики, являются очень высокие требования к конструкции уплотнения подвижного соединения штока, а так же влияние температуры окружающей среды на упругую характеристику такого устройства.

В подвесках современных колесных машин все большее применение находят пневмогидравлические автономные и групповые упругие устройства (рис. 1, *м* и *у*) [15, 16]. Рабочим телом в этих упругих устройствах является нейтральный газ (аргон, неон, гелий и др.), находящийся под давлением 20-30 МПа в герметичной полости аккумулятора, отделенной от рабочей жидкости гибкой диафрагмой или поршнем. При движении колесной машины по неровностям дороги соответственно происходят перемещения поршня гидроцилиндра упругого устройства, а вытесняемая при этом рабочая жидкость воздействует на находящиеся под давлением диафрагму или поршень пневмогидроаккумулятора. Оснащенные системой клапанов такие упругие устройства одновременно выполняют и функции амортизатора, что делает подвеску более компактной. С помощью предусмотренной системы клапанов в таких устройствах обеспечивается автоматическая компенсация естественных утечек рабочей жидкости через уплотнения подвижных соединений. Привлекательным достоинством пневмогидравлических упругих устройств является также их хорошая

приспособленность к ручному и (или) автоматическому управлению, как упругой характеристикой (кривая 4 на рис. 2), так и регулированию величины дорожного просвета машины. Кроме этого, благодаря общему пневмогидроаккумулятору в групповых пневмогидравлических упругих устройствах, обеспечиваются компактность и существенное снижение массы подвески в целом, а также имеется возможность рекуперирования энергии. Недостатки пневмогидравлических упругих устройств заключаются в повышенной сложности конструкции и инерционности работы, а также зависимости их рабочих параметров от температуры окружающей среды.

В последние годы все большее внимание разработчики новой колесной техники уделяют подвескам с электромагнитными упругими устройствами (рис. 1, ϕ). Они относительно не сложны в изготовлении, надежны в работе, практически не зависят от температуры окружающей среды, просты в эксплуатации. Важным достоинством электромагнитных упругих устройств является легкость управления ими с помощью системы датчиков и бортовых ЭВМ колесных машин. Благодаря этому силовая характеристика таких устройств формируется автоматически в режиме реального времени, практически мгновенно и идеально адаптируясь к изменяющимся условиям функционирования транспортного средства (кривая 5 на рис. 1) [17, 18]. При этом отпадает необходимость использования традиционных амортизаторов, роль которых более успешно выполняет управляемый электромагнитный упругий элемент. Очевидно, что вследствие естественной возможности использования таких упругих устройств в системах рекуперации энергии, наиболее целесообразно их применение в подвесках электро- и гибридных колесных машин.

К основным недостаткам электромагнитных упругих устройств следует отнести их относительно большие размеры и массу, повышенную сложность компоновки в подвесках колесных машин, необходимость комплектования и встраивания электронной системы управления таким упругим устройством в общую систему управления машины, они потребляют достаточно много электроэнергии, а также не обеспечивают возможность фиксации кузова по высоте пола при выключенной системе электроснабжения машины на стоянке. Однако, вследствие перспективности использования в подвесках колесных машин электромагнитных упругих устройств, разработчики новой техники, несмотря на отмеченные многочисленные недостатки, интенсивно работают над их устранением и дальнейшем совершенствовании таких устройств.

Выполненный анализ различных конструкций упругих устройств, используемых в подвесках современных колесных машин, позволяет сделать следующие выводы:

проблема создания эффективных упругих устройств подвесок колесных машин в настоящее время остается актуальной;

используемые в подвесках различные типы упругих устройств в целом обеспечивают потребность в них всей номенклатуры колесных машин;

несмотря на отдельные прогрессивные технические решения конструкции современных упругих устройств подвесок все еще далеки от совершенства и для них, в той или иной степени, характерны следующие основные недостатки: они не обеспечивают необходимой силовой характеристики, обладают низкой удельной энергоемкостью, недостаточно надежны, подвержены влиянию температуры окружающей среды, не способны рекуперировать энергию, не приспособлены к работе в независимых подвесках, неудобны и трудоемки при обслуживании;

отсутствие классификации упругих устройств затрудняет принятие оптимальных решений на начальной стадии проектирования подвесок.

К настоящему времени многочисленные конструкции подвесок автомобилей достаточно подробно и глубоко исследованы, а их результаты опубликованы в специальной научной и технической литературе. В ряде работ авторами даны обоснования и представлены классификации современных конструкций подвесок автомобилей [1, 3, 10 и др.]. В тоже время в подавляющем большинстве исследований вопросам оптимального выбора упругих элементов и устройств для подвесок колесных машин все еще уделяется недостаточное внимание. При этом отсутствие комплексного подхода при решении многочисленных и противоречивых требований, предъявляемых к упругим устройствам подвесок, неоправданно сдерживает создание их более эффективных конструкций. В частности, по указанной причине, все еще отсутствует классификация упругих устройств подвесок для колесных машин. В этой связи, выполненный анализ различных по назначению и исполнению традиционных и перспективных конструкций упругих устройств (рис. 1), позволил разработать достаточно полную классификацию. Она в целом учитывает основные отличительные признаки и особенности конструкции, производства и эксплуатации упругих устройств, которые важно принимать во внимание при проектировании подвесок колесных машин в целом (рис. 3).



Рисунок 3 – Классификация упругих устройств, используемых в подвесках колесных машин

Предложенная классификация заполняет имевшийся пробел в разделах специальной научной и технической литературы, посвященных систематизации основных рабочих элементов подвесок колесных машин – их упругих устройств. Предложенная классификация упругих устройств является важной составной частью имеющейся общей классификации подвесок колесных машин и способствует рациональному выбору кинематической схемы упругого устройства и подвески в целом. Это позволяет разработчикам еще на начальной стадии проектирования колесной машины принять оптимальное решение и таким образом существенно сократить сроки и трудозатраты на создание эффективной конструкции подвески.

Библиографический список

- 1 Вахламов, В. К. Автомобили : Конструкция и эксплуатационные свойства [Текст] : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В. К. Вахламов. – М. : Издательский центр «Академия», 2009. – 480 с.
- 2 Иванов, А. М. Основы конструкции автомобиля [Текст] / А. М. Иванов [и др.]. – М. ООО «Книжное издательство «За рулем», 2007. – 336 с.
- 3 Оsepчугoв, В. В. Автомобиль : Анализ конструкций, элементы расчета : Учеб. для студ. вузов по спец. «Автомобили и автомобильное хозяйство» [Текст] / В. В. Оsepчугoв, А. К. Фрумкин. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.
- 4 Дэниэлс, Дж. Современные автомобильные технологии [Текст] / Джэф Дэниэлс. – М. : АСТ : Астрель, 2007. – 223 с.

- 5 Рубец, А. Д. История автомобильного транспорта [Текст] / А. Д. Рубец. – М. : Эксмо, 2008. – 304 с.
- 6 Пономарев, С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов [Текст] / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 326 с.
- 7 Баранов, Ю. П. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] : учебник для вузов / Ю. П. Баранов [и др.] ; под ред. Г. В. Крамаренко. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1983. – 488 с.
- 8 Сокол, Н. А. Основы конструирования и расчета автомобиля [Текст] / Н. А. Сокол, С. И. Попов. – Ростов-н/Д : Феникс, 2006. – 303 с.
- 9 Кузнецов, Е. С. Техническая эксплуатация автомобилей [Текст] : учебник для вузов. 4-е изд. перераб. и доп. / Е. С. Кузнецов [и др.]. – М. : Наука, 2001. – 535 с.
- 10 Болштянский, А. П. Основы конструирования автомобиля [Текст] : учебн. пособие для вузов / А. П. Болштянский, Ю. А. Зензин, В. Е. Щерба ; под ред. В. Е. Щербы. – М. : Легион-Автодата, 2005. – 312 с.
- 11 Васильев, В. С. Автомобильный справочник [Текст] / В. С. Васильев [и др.] ; под общ. ред. В. М. Приходько. – М. : ОАО Машиностроение, 2004. – 704 с.
- 12 Абрамов, Е. И. Элементы гидропривода [Текст] : справочник / Е. И. Абрамов, К. А. Колисниченко, В. Т. Маслов. – Киев, «Техника», 1977. – 320 с.
- 13 Посметьев, В. И. Методологические основы повышения эффективности почвообрабатывающих орудий с помощью предохранителей [Текст] : монография / В. И. Посметьев. – Воронеж : ВГЛТА, 1999. – 196 с.
- 14 Кондаков, Л. А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем [Текст] : учеб. пособие / Л. А. Кондаков. – М. : Машиностроение, 1982. – 216 с.
- 15 Посметьев, В. И. Обоснование перспективных конструкций предохранителей для рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий [Текст] : монография / В. И. Посметьев. – Воронеж : ВГЛТА, 2000. – 248 с.
- 16 Вахламов, В. К. Автомобили : Эксплуатационные свойства [Текст] : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. К. Вахламов. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 240 с.
- 17 Электромагнитная подвеска Bose [Электронный ресурс]. – режим доступа : <https://www.drive2.ru/b/721443/> – Загл. с экрана.
- 18 Электромагнитная подвеска – как она устроена [Электронный ресурс]. – режим доступа : <https://auto.today/bok/3108-elektromagnitnaya-podveska-kak-ona-ustroena.html> – Загл. с экрана.