

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЕЙ

Огороднов С.М., Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Тумасов А.В.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», Нижний Новгород, Россия (603950, ГСП-41, г. Н.Новгород, ул. Минина, д.24), e-mail: makvl2010@gmail.com

В статье произведен анализ работ по оценке плавности хода автомобилей. Описываются предложения по способу формирования возмущений от дорожного полотна для прогнозирования долговечности деталей и узлов подвески легких коммерческих автомобилей. Представлены результаты работы по выбору и обоснованию расчетной модели транспортного средства и спектра режимов движения, наиболее приближенных к условиям эксплуатации машины. Проанализированы величина и характер возмущений, передаваемых на колеса автомобиля со стороны дороги, определяемые параметрами продольного макро- и микропрофиля. Показано что микропрофиль наиболее полно может быть описан с помощью корреляционной функции или соответствующей спектральной плотности дисперсий ординат. Приведен алгоритм формирования истории нагружения элементов подвески автомобилей при выбранных режимах эксплуатации, а также намечены пути дальнейших исследований.

Ключевые слова: легкий коммерческий автомобиль, возмущения от дорожного полотна, детали и узлы подвески, долговечность.

THE JUSTIFICATION OF METHODS OF FATIGUE LIFE ESTIMATION FOR VEHICLE SUSPENSION'S PARTS

Ogorodnov S.M., Zezulin D.V., Makarov V.S., Tumasov A.V.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E.Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, street Minina, 24), e-mail: makvl2010@gmail.com

The paper contains the analysis of different scientific studies that are related with the problem of estimation of vehicles ride. There are some proposals for the method of generating of road surface disturbing action for the fatigue life estimation of light commercial vehicles suspensions. There is the description of justification of the vehicle simulation model and moving conditions that are close to the actual operating conditions. The analysis of road surface disturbing transmitted to vehicle's wheel in dependence of micro and macro road profile is presented. It is shown that the micro road profile could be fully described by using of correlation function or spectral density of distortion. The algorithm of loading history forming for the vehicle's suspension parts is described as well as further ways of research development are indicated.

Keywords: light commercial vehicle, road surface disturbing, parts and components of suspension, fatigue life.

Автомобильная промышленность является одним из крупных потребителей материальных ресурсов, в первую очередь металла и металлического проката. Снижение массы металлов, используемых в конструкции автомобилей, позволяет не только существенно снизить производственные издержки, но и улучшить многие эксплуатационные свойства транспортных средств. Современные технологии позволяют создавать и успешно эксплуатировать автомобили, в которых отдельные детали и узлы из неметаллических материалов интегрированы в его конструктивную схему. Но направление работ по совершенствованию методов расчетов деталей и узлов с целью оптимизации их размеров, формы и массы остается наиболее значимым и позволяющим получить эффективный инструмент для выбора требуемых показателей конкурентоспособности автомобиля, планирования его надежности, расхода запасных частей и др.

Вероятностные методы расчетов автомобильных узлов и деталей на прочность и долговечность в настоящее время считаются наиболее совершенными и адекватными, позволяющими учесть случайный характер изменения параметров, от которых зависят характеристики динамической системы. Для практической реализации этих методов необходимо иметь данные о нагрузочных режимах деталей машин, получаемых в результате расчета или эксперимента, и данные об усталостных характеристиках материалов основных элементов конструкции. Моделирование нагрузочных режимов конструктивных элементов машины, оценка их долговечности реализуются с помощью специальных программных комплексов, и это не является сложной научно-технической задачей. Однако эта фаза работы является заключительной, которой должна предшествовать работа по выбору и обоснованию расчетной модели транспортного средства, величины и характера возмущения, передаваемого от опорной поверхности, спектра режимов движения, наиболее приближенных к условиям эксплуатации машины.

Выбор расчетной модели целесообразно выполнять с учетом значимости силовых воздействий в суммарной оценке возмущения. Известно, что динамические нагрузки, действующие на элементы конструкции и определяющие их долговечность, зависят от возмущений, формирующихся при движении автомобиля по неровной дороге. Термин «возмущение» используется в отношении определенной расчетной модели (схемы) автомобиля. В первом приближении динамическая модель системы поддрессоривания автомобиля (рис.1) может приниматься линейной, а её свойства определяются с помощью зависимости: $S_y = W(p)S_q(p)$, где $S_y(p), S_q(p)$ – соответственно спектральные плотности сигналов на входе и выходе динамической системы; $W(p)$ – передаточная функция динамической системы.

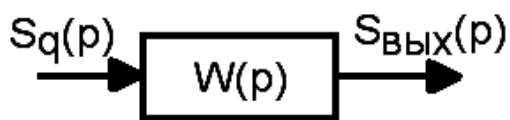


Рис. 1. Эквивалентная структурная схема динамической системы

Для «линейного» двухосного автомобиля динамическая расчетная модель имеет только два входа, так как задержку воздействия на колёса задней оси по сравнению с воздействием на колёса передней оси можно считать элементом системы.

Характер возмущения (входной сигнал) определяется распределением ординат микропрофиля по правой $q_{п}(t)$ и левой $q_{л}(t)$ колеям поверхности движения. Анализ уравнений колебаний линейной динамической системы показывает, что возмущением для поперечных угловых колебаний поддрессоренных и неподдрессоренных масс автомобиля $q_{пн}(t)$ может быть полуразность ординат микропрофиля по левой и правой колеям движения, а для продольных – полусумма ординат микропрофиля по левой и правой колеям движения:

$q_{\text{пн}}(t) = 0,5[q_{\text{л}}(t) - q_{\text{п}}(t)], q_{\text{пр}}(t) = 0,5[q_{\text{л}}(t) + q_{\text{п}}(t)]$, где $q_{\text{пн}}(t), q_{\text{пр}}(t)$ – соответственно возмущение для поперечных и продольных угловых колебаний подрессоренных и неподдресоренных масс автомобиля. Анализ этих выражений показывает, что колебания масс линейной динамической системы в продольной и поперечной плоскостях независимы. Поэтому расчетные схемы автомобиля могут быть составлены и исследованы отдельно для указанных видов колебаний.

В силу особенностей поверхностей автомобильных дорог, колебания автомобиля в поперечной плоскости не могут существенно влиять на величину деформаций упругих элементов подвески, напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов подвески и связанных с ними деталей и узлов несущей системы. Поэтому при решении задач по оценке напряженно-деформированного состояния элементов конструкции подвески целесообразно ограничиться исследованием возмущений, формируемых колебаниями автомобиля в продольной плоскости.

При решении задачи формирования возмущений, передаваемых от опорной поверхности, дополнительно может быть учтена конструктивная особенность системы подрессоривания, зависящая от значения коэффициента распределения подрессоренных масс « ε ». $\varepsilon = \rho^2 / (ab) = I_{xx}^{\text{п}} / (M_{\text{п}} ab)$, где ε – коэффициент распределения подрессоренных масс; ρ – приведенный радиус инерции подрессоренных масс ТС; $I_{xx}^{\text{п}}$ – момент инерции подрессоренных масс автомобиля при колебаниях в продольной плоскости; $M_{\text{п}}$ – масса подрессоренных частей автомобиля; a, b – расстояния от центра масс автомобиля до передней и задней осей автомобиля.

При $\varepsilon = 1$ и $\rho^2 = ab$, колебания каждой из подвесок описываются независимыми системами уравнений, а расчетные схемы вертикальных колебаний передней и задней подрессоренных масс двухосного автомобиля могут быть представлены соответствующими динамическими расчетными моделями. Приемлемые результаты для практических задач оценки напряженно-деформированного состояния деталей подвесок могут быть получены при использовании двухмассовых расчетных схем (рис. 2). При исследовании вертикальных колебаний автомобиля с помощью двухмассовой расчетной схемы в качестве возмущения допустимо использовать профиль дороги по одной колее или полусумму ординат профилей левой и правой колеей. Основным недостатком подобного способа формирования возмущений является допущение о точечном контакте колеса с опорной поверхностью, не учитывающего сглаживающие свойства шины.

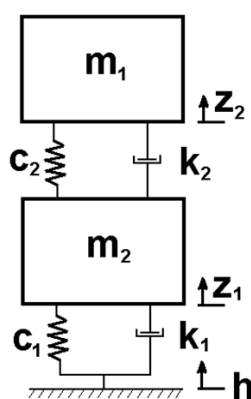


Рис. 2. Расчетная модель подвески

Величина и характер возмущений, передаваемых на колеса автомобиля со стороны дороги, определяется в основном параметрами продольного макропрофиля пути и микропрофиля опорной поверхности.

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный статистический материал, касающийся распределения продольных уклонов макропрофиля автомобильных дорог в зависимости от типа рельефа [1] и характеристик микропрофиля опорных поверхностей.

Движение автомобиля по макропрофилю в основном влияет на работу двигателя и трансмиссии. Воздействие на подвеску обусловлено двумя факторами – изменением величины нормальной составляющей силы веса автомобиля и нормальной силы инерции, возникающей при движении автомобиля по криволинейной продольной траектории. В обычных условиях эксплуатации относительно небольшие значения продольных уклонов макропрофиля автомобильных дорог и небольшие скорости движения не могут существенно влиять на характер колебаний поддресоренных масс и их величину. Характеристики продольного макропрофиля целесообразно использовать для определения закона распределения скоростей автомобиля на выбранном маршруте движения. Скорость движения в значительной степени влияет на формирование нагрузочных режимов деталей и узлов.

Наиболее значимыми для формирования возмущений, передаваемых на детали подвески, являются характеристики микропрофиля. Микропрофиль содержит низкочастотных составляющих поверхности дороги и состоит из неровностей с длиной волны от 0,1 до 100 м и амплитудами до 1 м. Эти неровности вызывают заметные колебания поддресоренных масс автомобиля на упругом элементе подвески, но практически не влияют на динамику движения. Использование микропрофиля в качестве возмущающего воздействия имеет ряд преимуществ. Микропрофиль дороги является стационарной эргодической функцией с нормальным законом распределения, и его параметры и характеристики исчерпывающе определяют его как случайную функцию.

Характеристики микропрофиля автомобильных дорог могут быть представлены различным образом. В работе [8] при описании микропрофиля выделяются отдельные неровности и затем строится закон распределения их размеров (длины и высоты). В работе [4] микропрофиль описывается непрерывной случайной функцией. Для указанных способов представления микропрофиля нагрузочный режим может быть задан функцией плотности распределения одного из параметров возмущения (деформации, силы или напряжений). В

этом случае долговечность деталей, подверженных усталостному разрушению в циклах

нагружения « u », определяется по общей формуле [5]:
$$u = \frac{a}{\sigma_1 r_1 \int \int \frac{f(\sigma(\sigma; r) d\sigma}{\varphi(\sigma; r)}}$$
, где a –

корректирующий коэффициент, σ – напряжения, r – коэффициент асимметрии цикла, $f(\sigma; r)$ – функция плотности распределения нагрузочного режима детали, $\varphi(\sigma; r)$ – поверхности усталости рассчитываемой детали.

Для автомобилей долговечность принято измерять в километрах пробега L , определяемую по формуле: $L = u/z_L$, где z_L – число циклов нагружения детали на один километр пробега.

Структура микропрофиля, как случайного процесса, наиболее полно может быть описана с помощью корреляционной функции или соответствующей спектральной плотности дисперсий ординат микропрофиля [3]. В работе [3] описан метод вероятностного расчета усталостной долговечности, в котором возмущение, действующее на деталь конструкции, определяется по его средней величине и суммарной плотности дисперсий. Ровность микропрофиля характеризуется среднеквадратичной высотой неровностей σ_q или их дисперсией. Частота внешнего воздействия (возмущения) зависит от длины неровностей и скорости движения автомобиля. Поэтому неровности различной длины оказывают разное воздействие на динамическую систему, состоящую из нескольких упруго связанных масс, обладающих собственными резонансными частотами. Распределение энергии амплитуд неровностей микропрофиля, в зависимости от их длины, устанавливается характеристикой спектральной плотности микропрофиля $S_q(\theta)$, где θ – пространственная (путевая) частота микропрофиля поверхности дороги. Спектральная плотность возмущения от микропрофиля дороги $S_q(\omega)$ является функцией частоты ω и связана с энергетическим спектром через скорость движения с помощью выражений $\theta = \omega/v = 2\pi/s$, где θ – путевая частота (частота по протяженности), v – скорость движения, s – длина неровности, ω – частота по времени.

Зная характеристику спектральной плотности $S_q(\omega)$, дисперсии любого из колебательных процессов σ_k^2 (перемещения, скорости, ускорения) для линейной модели подвески могут быть получены с учетом её преобразующих свойств.
$$\sigma_k^2 = \int_0^{\infty} |W_k(\omega)|^2 S_q(\omega) d\omega$$
, где k – индекс процесса, $W_k(\omega)$ – передаточная функция системы.

В некоторых случаях возмущение, действующее на детали подвески, должно формироваться с учетом дополнительных источников. Наиболее значимыми могут быть

возмущения, вызванные биением и неуравновешенностью колес и воздействием на систему поддрессоривания перевозимого груза. Например, биение и неуравновешенность колес вызывает периодические силы P_n (моменты), изменяющиеся с угловой частотой, пропорциональной угловой скорости вращения колес и влияющие на вертикальные колебания автомобиля. $P_n = m_n r_n \omega^2$, где P_n – возмущающая сила, m_n – неуравновешенная масса, r_n – радиус центра масс, ω – угловая скорость колеса.

Формирование спектра режимов движения, наиболее приближенных к условиям эксплуатации транспортных машин, является не менее важным условием получения значимых оценок долговечности изделия. Сложность этой задачи объясняется огромным количеством собственников коммерческого транспорта и небольшим количеством машин, находящихся в распоряжении каждого из них, что обуславливает универсальный характер эксплуатации машин, многообразие маршрутов перевозок и видов перемещаемых грузов.

Дополнительной сложностью при формировании спектра эксплуатационных режимов автомобилей является значительная неравномерность скорости движения. В работах [6; 9] приводятся данные по распределению скоростей движения автомобилей на различных дорогах. С учетом обозначенных проблем представляется целесообразным отказаться от попыток решения задачи долговечности в отношении пусть и достаточно представительной выборки со сходными условиями эксплуатации в пользу сравнительной оценки долговечности конструктивных вариантов при моделировании движения по специально разработанному (подобранному) маршруту. Для моделирования движения автомобилей может быть подобран условный маршрут [6], представляющий совокупность определенных участков пути, имеющих постоянные, но отличные для каждого участка параметры. Каждый такой участок характеризуется типом опорной поверхности, углом подъема (спуска), протяженностью, кривизной в плане и пр. Чередование участков составляет некую закономерность, обеспечивающую максимальное приближение режимов движения автомобиля к тем реальным эксплуатационным условиям, которые стремятся моделировать.

На практике подобные методы составления типовых маршрутов широко используются при испытаниях автомобилей для определения показателей эксплуатационных свойств, в том числе для определения показателей надежности. Отдельные типовые маршруты регламентируются нормативными документами, например ОСТ 37.001.472-88 «Приемочные испытания автотранспортных средств. Типовая программа испытаний». В соответствии с этим документом устанавливается распределение пробега по видам опорных поверхностей для полноприводных автомобилей. Аналогичные данные для полноприводных автомобилей даны в работе [7]. Параметры кривизны траектории и скоростного режима на отдельных участках маршрута могут быть заданы в соответствии с методическими материалами

НИЦИАМТ. Проведенный анализ существующих методов формирования эксплуатационной нагруженности автомобилей показал необходимость их доработки для прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкции коммерческих автомобилей.

Формирование нагрузочного режима для конструктивных элементов подвески может быть выполнено с использованием статистического материала о характере возмущений, действующих на автомобиль при движении по типовым дорогам полигона НАМИ. Такой подход к формированию нагрузки привлекает стабильностью статистических характеристик дорог автополигона, что обеспечивает многократное воспроизведение историй нагружения исследуемых конструктивных элементов и возможность сравнения результатов аналитических расчетов и натурных испытаний. С использованием полученных историй нагружений (рис.3) можно производить качественную оценку долговечности виртуальных прототипов деталей автомобилей (сравнительная оценка типа «лучше/хуже») и проводить оптимизацию по критерию долговечности до изготовления физических прототипов.

Для количественной оценки усталостной долговечности элементов конструкций автомобилей необходим иной методический подход. Для того чтобы установить характерные условия эксплуатации автомобилей, необходимо разработать их классификацию на основании систематизированных экспериментальных данных. Автомобильные дороги по условиям движения и доступа на них транспортных средств разделяют на три класса [2]: автомагистраль, скоростная дорога, дорога обычного типа (нескоростная дорога).

По транспортно-эксплуатационным качествам и потребительским свойствам автомобильные дороги разделяют на категории в зависимости от: количества и ширины полос движения; наличия центральной разделительной полосы; типа пересечений с автомобильными, железными дорогами, трамвайными путями, велосипедными и пешеходными дорожками; условий доступа на автомобильную дорогу с примыканиями в одном уровне.

Принято выделять пять категорий дорог [2], отличающихся расчетными скоростями (наибольшими возможными по условиям устойчивости и безопасности) одиночных автомобилей при нормальных условиях погоды и сцепления шин автомобилей с поверхностью проезжей части, которым на наиболее неблагоприятных участках трассы соответствуют предельно допустимые значения элементов дороги.

Основным техническим показателем, определяющим транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог, является тип дорожной одежды и верхнего слоя дорожного покрытия. Причем тип и состояние дорожного покрытия может варьироваться в очень широких пределах для каждой из существующих категорий дорог.

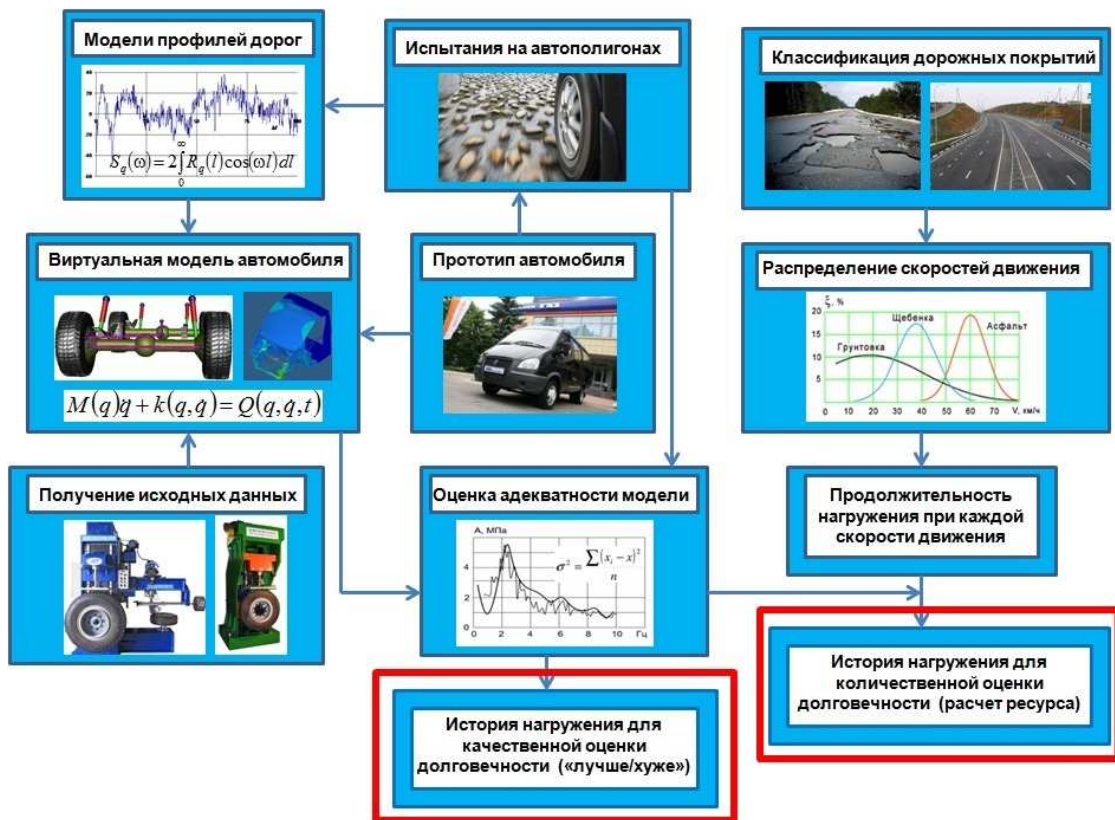


Рис. 3. Алгоритм формирования истории нагружения элементов подвески и несущей системы автомобилей при выбранных режимах эксплуатации

Обобщенную по результатам анализа информационных источников структуру автомобильных дорог по типам покрытия можно предложить в следующем виде.

1. С твёрдым покрытием, в том числе с усовершенствованным покрытием, включая цементобетонные, асфальтобетонные и прочие с градацией состояния покрытия (хорошее, удовлетворительное, сильноизношенное) и с покрытием переходного типа (щебёночные, гравийные, мостовые).
2. Грунтовые с градацией состояния покрытия (удовлетворительное, разбитое с величиной среднеквадратических отклонений 3-5 см).

Учитывая особенности эксплуатации коммерческих автомобилей, в классификации дорог по типам дорожного покрытия может быть оставлен только асфальтобетон (цементобетонные дороги крайне редко встречаются в эксплуатации) и переходные типы покрытий.

Используя параметры каждого вида дорог из представленной классификации, возможно проведение вычислительных экспериментов по нагруженности элементов конструкции автомобилей с последующей дифференцированной оценкой долговечности исследуемых агрегатов и узлов. Однако реально эксплуатация происходит в смешанных дорожных условиях. Поэтому оценку долговечности элементов автомобилей целесообразно производить, основываясь на данных по распределению пробега автомобилей по видам

дорог. Проведенный анализ существующих методов формирования эксплуатационной нагруженности показал недостаточную обоснованность используемых результатов статистических исследований, а также их неприменимость для прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкции легких коммерческих автомобилей вследствие отсутствия информации по пробегу транспортных средств данного класса.

Таким образом, в качестве основного направления дальнейших исследований следует выделить определение среднестатистических условий эксплуатации легких коммерческих автомобилей, что предполагает:

- 1) проведение экспериментальных работ по определению состояния покрытия по всей протяженности дорог общего пользования отдельных регионов в соответствии с принятой классификацией;
- 2) определение долевого распределения участков дорог с разным качеством покрытия в общей протяженности дорог рассматриваемых территорий;
- 3) проведение статистических исследований интенсивности дорожного движения в городских условиях для моделирования распределения вероятных скоростей движения легких коммерческих автомобилей по дорожным профилям сформированного комплекта;
- 4) определение статистического распределения скоростей движения легких коммерческих автомобилей в условиях загородных дорог с учетом технических возможностей (тягово-скоростных характеристик) транспортных средств и параметров макропрофиля (распределения продольных уклонов), а также уровня вибрационных воздействий дорожного полотна на водителя и пассажиров;
- 5) расчет относительного времени воздействия на колеса автомобиля каждого дорожного профиля из сформированного комплекта, характеризующего все дороги общего пользования, в общем пробеге транспортного средства.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0006 от 12.02.2013 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года №218).

Список литературы

1. Безбородова Г.Б., Глушко В.Г. Моделирование движение автомобиля. – Киев:Вища школа, 1978. – 150 с.
2. ГОСТ Р 52398-2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования.

3. Пархиловский И.Г. Автомобильные листовые рессоры: теория, расчет и испытания. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.:Машиностроение, 1968. – 232 с.
4. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. - Изд.3-е, переработ. и доп. - М. :Машиностроение, 1972. -С.392.
5. Успенский И.Н. Вероятностные расчеты на долговечность автомобильных узлов :учеб.пособ. – Горький: ГПИ, 1983. - С. 76.
6. Шлейхер А.А., Крылов А.А. Методика формирования модели дорожного воздействия // Динамика машин рабочих процессов:сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. - С. 151-157.
7. Шухман С.Б. Исследование и разработка метода повышения эффективности колесных машин за счет рационального типа силового привода :дис. ... докт. тех. наук. – М., 2001.- 371 с.
8. Яценко Н.Н. Колебания, прочность и форсированные испытания грузовых автомобилей. - М.: Машиностроение, 1972. -233 с.
9. Яценко Н.Н., Прутчиков О.К. Плавность хода грузовых автомобилей. – М.: Машиностроение, 1969. - 256 с.

Рецензенты:

Беляков В.В., д.т.н., профессор кафедры «Автомобили и тракторы» ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», г. Нижний Новгород.

Молев Ю.И., д.т.н., профессор кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», г. Нижний Новгород.