

DOI: 10.12731/2227-930X-2021-11-4-18-30

УДК 629.331

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВЕСКИ АТС В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Тихов-Тинников Д.А.

Неисправности подвески могут значительно снизить сцепление колес с дорогой, и, следовательно, свойства устойчивости автомобиля. Существующие методы диагностирования подвесок не связаны с параметрами, характеризующими устойчивость движения АТС, и не позволяют осуществлять оперативный контроль в условиях эксплуатации. Для контроля устойчивости предлагается использовать дорожные и стендовые методы, характеризующие возмущенным состоянием подвески и непрерывным действием боковой силы. Теоретические исследования выполнены с использованием разработанных математических моделей, в основу которых положены описания функционирования подрессоренной и неподдресоренных масс автомобиля, а также взаимодействия эластичных шин с опорной поверхностью. Экспериментальные исследования включают стендовые испытания шин, амортизаторов и сайлентблоков различного технического состояния, а также дорожные исследования кинематических параметров движения автомобиля категории М1. В результате разработан дорожный метод контроля технического состояния амортизаторов с учётом их влияния на показатели устойчивости.

Цель – Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение метода диагностирования систем подрессоривания по параметрам, связанным с устойчивостью движения автотранспортного средства.

Методы проведения работы: использованы экспериментальные методы, методы математического моделирования и численные методы решения дифференциальных уравнений.

Результаты: разработаны экспериментальные методики и математический аппарат для исследования влияния параметров системы поддресоривания на устойчивость движения автотранспортных средств.

Область применения результатов: результаты могут быть использованы организациями и учреждениями, занимающихся разработкой методов диагностирования автотранспортных средств.

Ключевые слова: автомобиль; устойчивость движения; подвеска; техническое состояние; диагностика

METHODS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF THE SUSPENSION OF VEHICLE UNDER OPERATING CONDITIONS

Tikhov-Tinnikov D.A.

Suspension faults can reduce wheel traction and therefore reduce vehicle stability. Existing diagnostic methods for the suspension do not take into account the stability of the vehicle. To control stability, it is proposed to use road and bench methods, characterized by suspension vibrations and constant lateral force. Theoretical studies were carried out using mathematical models based on the description of the functioning of sprung and unsprung vehicle masses, as well as elastic tires. Experimental studies include bench tests of tires, shock absorbers and silent blocks of various technical conditions, as well as road studies of the kinematic parameters of the M1 category vehicle. As a result, a road method for monitoring the technical condition of shock absorbers was developed, taking into account their influence on stability indicators.

Purpose – Theoretical substantiation and experimental confirmation of the method for diagnosing suspension systems by parameters related to the stability of the vehicle movement.

Methodology includes experimental methods, mathematical modeling methods and numerical methods for solving differential equations.

Results: experimental methods and mathematical apparatus were developed to study the influence of the parameters of the suspension system on the stability of the movement of vehicles.

***Practical implications:** the results can be used by organizations and institutions involved in the development of diagnostic methods for vehicles.*

***Keywords:** car; driving stability; suspension; technical condition; diagnostics*

Введение

Статистика аварийности свидетельствует о значительной доле дорожно-транспортных происшествий, происходящих по причине потери устойчивости транспортных средств. В 2019 году в России было зарегистрировано более 164 тысяч ДТП, из которых свыше 13 тысяч или 8% являются опрокидываниями, т.е. напрямую связаны с потерей устойчивости движения транспортного средства. Число погибших в таких ДТП составило 1973 человека, раненых – 17481.

Устойчивость движения автомобиля определяется взаимодействием эластичной шины с опорной поверхностью. В свою очередь процессы, происходящие в пятне контакта, зависят не только от характеристик шин и дороги, но и от параметров элементов подвески. Неудовлетворительное техническое состояние элементов подвески оказывает влияние на характер механики силового взаимодействия шины в контакте с дорожной поверхностью, что приводит к снижению сцепления в боковом направлении, а, следовательно, и ухудшению устойчивости АТС. Несмотря на наличие указанной связи, применяемые в условиях эксплуатации методы диагностирования подвесок основаны на критериях, которые не связаны с параметрами, характеризующими устойчивость движения АТС. При этом указанные методы не позволяют осуществлять оперативный контроль в условиях эксплуатации. В действующей процедуре технического осмотра оценка состояния подвески вообще не предусмотрена. Получившие широкое распространение площадочные вибростенды, лишены указанного недостатка, однако диагностирование с их использованием характеризуется большой долей ложно отрицательных диагнозов [1]. Данные стенды не позволяют определять величины боковой реакции в виброрежиме, следовательно, они не могут быть использованы для оценивания устойчивости АТС.

Применяемые при доводке и сертификации автомобилей методы оценки устойчивости движения [2] также не могут использоваться в условиях эксплуатации, по причине повышенной опасности испытаний, высоких требований к водителям-испытателям, а также необходимости наличия специального оборудования и испытательных полигонов.

Представленные факторы формируют проблемную ситуацию в области контроля устойчивости движения, решение которой требует применения научных подходов для разработки новых и совершенствования существующих методов диагностирования подвески в целях повышения активной безопасности АТС в условиях эксплуатации.

Постановка задачи

Выдвинуто предположение о том, что выполнение оценки технического состояния подвески по критериям устойчивости в условиях эксплуатации возможно на основе измерения и анализа силовых и кинематических параметров при движении АТС, под действием боковой силы с переездом единичной неровности.

Для достижения цели необходимо решить задачи, предусматривающие: разработку математических моделей; установление функциональных связей между параметрами устойчивости и параметрами технического состояния подвески и шин; обоснование методик дорожных и стендовых испытаний, а также выполнение производственной проверки разработанных научных положений.

Методы и материалы

Контроль устойчивости АТС предлагается осуществлять двумя дорожными методами. Первый метод предусматривает движение автомобиля по окружности, второй по поперечному уклону. В обоих случаях АТС будет испытывать боковую нагрузку в виде центробежной силы или боковой составляющей от веса автомобиля. В процессе контроля автомобиль движется с заданной скоростью, в середине участка переезжает единичную неровность, которая воз-

буждает в подвеске затухающие колебания. Непрерывное действие на автомобиль боковой силы вызовет его отклонение от заданной траектории тем сильнее, чем хуже техническое состояние подвески. Оценка устойчивости в этих случаях может производиться как по кинематическим, так и по силовым параметрам. Кинематическими параметрами будут углы отклонения продольной оси АТС от заданной траектории движения. К силовым параметрам относим значения и характер изменения боковых реакций по колесам автомобиля после переезда единичной неровности. В простейшем случае силовые и кинематические параметры обосновываются исходя из анализа системы (1), определяющей динамическое равновесие автомобиля, движущегося под действием боковой силы (рис. 1):

$$\begin{cases} ma_y = R_{y1} + R_{y2} - mv_x\omega_z \\ J_z\dot{\omega}_z = R_{y1}a - R_{y2}b \end{cases} \quad (1)$$

где: m – масса автомобиля; a_y – боковое ускорение; R_{y1} и R_{y2} – суммарные боковые реакции в пятнах контакта колес с дорогой передней и задней осей соответственно; v_x – продольная скорость; ω_z и $\dot{\omega}_z$ – угловая скорость и ускорение поворота вокруг вертикальной оси, J_z – момент инерции автомобиля относительно вертикальной оси, a и b – расстояние от центра масс до передней и задней осей.

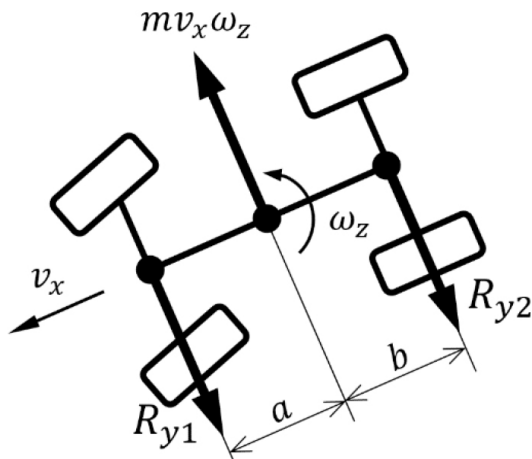


Рис. 1. К определению параметров оценки устойчивости движения АТС

Оценку технического состояния подвески также возможно осуществлять по косвенным критериям устойчивости на диагностических стендах. Известна методика оценки влияния технического состояния подвески на характеристики сцепления шин при диагностировании автомобиля на вибростенде [3]. Оценочным критерием при этом является минимальный коэффициент бокового сцепления шин, представляющий собой минимальное значение боковой реакции на колесах в виброрежиме к нормальной реакции в статике. Метод не проработан в части установления корреляционных зависимостей между параметрами, получаемыми при испытании на стенде, и параметрами устойчивости автомобиля в движении. Указанное обстоятельство можно рассматривать как основную задачу для его дальнейшего совершенствования.

Рассматривая устойчивость как способность противостоять внешним возмущающим воздействиям можно сказать, что на формирование ее показателей влияют многие факторы. Анализ их взаимодействия позволяет сделать вывод, что в качестве основы для теоретического описания процесса функционирования АТС в режиме дорожных испытаний можно использовать общепринятые математические модели, описывающие пространственное движение автомобиля.

Основу модели составляет математический аппарат, описывающий пространственное движение поддрессоренной и неподдрессоренных масс, а также взаимодействие эластичных шин с опорной поверхностью. Процесс рассматривается в подвижной и неподвижной системах координат. Динамика перемещения поддрессоренной массы рассчитывается по принципу Д'Аламбера для шести степеней свободы. Динамика неподдрессоренных масс – для одной степени свободы в направлении вертикальной оси.

Значения продольных и поперечных реакций в пятне контакта шины с дорогой в стационарных и нестационарных режимах определяются по методике А.Б. Дика [4] с использованием нормированной функции проскальзывания. При этом для определения скорости смещения центра пятна контакта в боковом направлении в нестационарном режиме разработано математическое описание динамики колебания колеса с эластичной шиной под действием боковых сил [5].

Для определения параметров движения одиночного колеса с эластичной шиной нагруженного поддрессоренной массой применяется модель четверти автомобиля. Единичная неровность задается в виде функции сглаживающей способности шины [6].

Силы сопротивления амортизатора представлены кусочно-линейной функцией в зависимости от скорости перемещения штока. Усилие закручивания сайлентблока рассчитывается с использованием разработанной на основе элементов Гука и Сен-Венана полумпирической модели.

Для экспериментальных исследований использовалось специально разработанное оборудование [7-10]. Характеристики амортизаторов были получены на рычажном механическом стенде, позволяющим определять усилия сжатия и отбоя, а также величину хода поршня амортизатора. Исследования характеристик автомобильных шин выполнялись на стенде с беговым барабаном, который позволяет измерять боковую реакцию и угол увода колеса при работе шины в стационарном и нестационарном режимах. Для процесса переезда единичной неровности стенд был дополнен конструкцией, имитирующей работу поддрессоренного автомобильного колеса. При этом измерялись нормальная реакция, действующая от неподдрессоренной массы на поддрессоренную, а также боковая реакция, действующая от колеса на поддрессоренную массу. Силовые характеристики закручивания сайлентблоков были получены на стенде, реализующем режимы статического и динамического нагружения.

Дорожные эксперименты реализованы по ранее представленному по методу движения автомобиля по окружности. На асфальтированной площадке был размечен коридор движения с радиусом средней линии 15 м. Поперек коридора, на вершине закругления, установлена неровность квадратного сечения со стороной 50 мм. Для испытуемого автомобиля были подготовлены комплекты исправных и неисправных амортизаторов, установка которых комбинировалась по 6 схемам. По каждой схеме автомобиль совершал заезды по размеченному участку со скоростью 40 км/ч. Взаимодействие с единичной неровностью вызывало возмущения в подвеске,

что приводило к изменению траектории, при этом измерялись углы поворота, крена и дифферента кузова. Измерение данных кинематических параметров осуществлялось с использованием гироскопической системы, выполненной на базе авиационных приборов.

Результаты

В результате выполненных стендовых экспериментальных исследований получены: скоростные характеристики исправных и неисправных амортизаторов; силовые характеристики сайлент-блоков от угла закручивания; стационарные и нестационарные по углу увода характеристики изменения боковой реакции эластичной шины; зависимости изменения нормальной и боковой реакции при переезде колесом с эластичной шиной единичной неровности. Сравнение полученных экспериментальных и расчетных данных показывают корректность и обоснованность принятых математических описаний рассматриваемых процессов.

Полученные результаты использовались при разработке математической модели процесса движения автомобиля по окружности с переездом единичной неровности [11]. Сравнение результатов расчета и эксперимента показывает, что в текущем виде модель хорошо описывает изменение угла поворота как для транспортного средства с исправными, так и с неисправными амортизаторами. По результатам исследования параметров дифферента и крена адекватность модели несколько ниже, но экспериментальные и расчетные средние значения углов дифферента являются весьма близкими величинами. Также близкими являются значения амплитуд этих параметров в момент переезда АТС неровности. Расчетные углы крена несколько меньше среднего значения по эксперименту, при качественном соответствии зависимостей в момент переезда неровности. Одной из основных причин, объясняющих наличие различий между расчетными и экспериментальными значениями крена и дифферента, является отсутствие в модели характеристик микропрофиля опорной поверхности.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса движения транспортного средства может быть использована для

аналитического исследования процесса изменения угла поворота и его производных. Результаты моделирования показывают, что наличие неисправных амортизаторов в подвеске автомобиля вызывает существенное изменение траектории прохождения поворотов в процессе движения по кругу и движения по одиночной неровности.

Способность АТС сохранять устойчивость движения при колебаниях неподрессоренных масс и действии боковой силы, можно количественно оценивать углами отклонения продольной оси от заданного направления движения, которые изменяются при переезде через единичную неровность колёс передней и задней оси. Эти углы, а также их разность приняты в качестве диагностических параметров дорожного метода [12] контроля технического состояния амортизаторов. На основе выявленных зависимостей изменения углов отклонения оси автомобиля от показателя, характеризующего снижение мощности сопротивления амортизатора, выраженного в %, определены нормативы диагностических параметров данного дорожного метода. Критические значения углов определены по критерию выхода АТС из коридора движения шириной 3 м.

Для количественной оценки влияния технического состояния амортизаторов на стабильность контакта шины с опорной поверхностью при испытаниях на стенде с беговым барабаном был принят коэффициент снижения боковой реакции [13]. Он представляет отношение пути, пройденного колесом при значении боковой реакции менее 80% от ее установившегося значения к заданному участку пути. По результатам дорожных экспериментов определены нормативные значения коэффициента снижения боковой реакции шины.

Заключение

Представленные результаты являются составляющими разрабатываемой методологии контроля технического состояния систем поддресоривания колесных транспортных средств в условиях эксплуатации. При этом для окончательного формирования методологии требуется проведение исследований устойчивости движения АТС по силовым параметрам, а именно по величине и характеру изменения боковых

реакций после взаимодействия колес с единичной неровностью. Для измерения реакций предусматривается применение двух тензометрических платформ, расположенных на траектории движения колес испытуемого автомобиля. Расчеты изменения боковых реакций при варьировании параметров технического состояния амортизаторов, выполненные с использованием математической модели АТС, позволили определить длину платформ и их расположение относительно единичной неровности. Критериями определения данных геометрических размеров являются чувствительность и однозначность боковых реакций по колесам автомобиля. Результаты планируемого эксперимента позволят ответить на вопрос о характере корреляционных связей между параметрами, получаемыми при испытании на вибростенде, и параметрами устойчивости автомобиля в движении.

Информация о спонсорстве. Исследование финансировалось Восточно-Сибирским государственным университетом технологий и управления и выполнено в рамках гранта «Молодые ученые ВСГУТУ – 2021»

Список литературы

1. Engineering Mechanics 2016: 22 International Conference. <http://pt.scribd.com/document/396150773/066bo-o-dyn>
2. ГОСТ 31507-2012. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. М.: Стандартиформ, 2013. 51 с.
3. Нгуен В.Н. Повышение эффективности диагностирования технического состояния подвески автотранспортных средств на вибростендах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. Иркутск, 2012. 20 с.
4. Дик А.Б. Расчет стационарных и нестационарных характеристик тормозящего колеса при движении с уводом: дис. ... канд. тех. наук. Омск, 1988. 228 с.
5. Kuznetsov N.Yu. et al. Lateral Response Formation Process between an Elastic Tire and a Supporting Surface When a Slip Angle Wheel Crosses a Single Irregularity // IOP Conference Series: Materials Science and

- Engineering. 2019. Vol. 632. P. 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/632/1/012030>.
6. Неволин Д.Г., Новосёлов Л.И. Математическое моделирование динамического процесса в подвески полуприцепа // Транспорт Урала. 2014. №4. С. 119-122.
 7. Федотов А.И., Кузнецов Н.Ю., Лысенко А.В. и др. Шинный тестер для исследования характеристик эластичных шин при движении колеса с уводом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. №2. С. 123-127.
 8. Федотов А.И., Кузнецов Н.Ю., Лысенко А.В. и др. Измерительный комплекс для контроля технического состояния подвески в дорожных условиях // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства. Международная научно-практическая конференция. Красноярск: Библиотечно-издательский комплекс Сибирского федерального университета, 2016. С. 487-492.
 9. Федотов А.И., Тихов-Тинников Д.А., Барадиев В.С. Оборудование для экспериментального определения силовых характеристик автомобильных сайлентблоков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. №8. С. 176-181.
 10. Кузнецов Н.Ю., Лысенко А.В., Тихов-Тинников Д.А. и др. Стенд для исследования влияния технического состояния амортизаторов на сцепление шины автомобильного колеса с опорной поверхностью // Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации. Иркутск: Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2017. С. 442-451.
 11. Fedotov A.I. et al. Simulation of Car Movement along Circular Path // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. 082018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/8/082018>
 12. Lysenko A.V. et al. Method of Roadholding Control of the Vehicle of Category M 1 under Operating Conditions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 632, 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/632/1/012046>
 13. Кузнецов Н.Ю., Федотов А.И., Лысенко А.В. и др. Нормирование показателей технического состояния амортизаторов автотранс-

портных средств для их контроля в условиях эксплуатации // Труды НАМИ. 2019. №4. С. 46-51.

References

1. Engineering Mechanics 2016: 22 International Conference. <http://pt.scribd.com/document/396150773/066bo-o-dyn>
2. *GOST 31507-2012. Avtotransportnye sredstva. Upravljaemost' i ustojchivost'. Tehnicheskie trebovanija. Metody ispytanij* [STATE STANDARD 31507-2012. Vehicles. Controllability and stability. Technical requirements. Test methods]. M.: Standartinform, 2013, 51 p.
3. Nguen V.N. *Povyshenie jeffektivnosti diagnostirovanija tehničeskogo sostojanija podveski avtotransportnyh sredstv na vibrostendah: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.22.10.* [Improving the efficiency of diagnosing the technical state of the vehicle suspension on vibration stands: abstract of thesis. dis. ... Cand. tech. Sciences: 05.22.10.]. Irkutsk, 2012, 20 p.
4. Dik A.B. *Raschet stacionarnyh i nestacionarnyh harakteristik tormozjashhego koleasa pri dvizhenii s uvodom* [Calculation of Stationary and Non-Stationary Characteristics of the Brake Wheel when Driving with a Slip Angle]. Omsk dis. ... cand. tech. sci., 1988, 228 p.
5. Kuznetsov, N Yu, et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 632, 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/632/1/012030>.
6. Nevolin D.G., Novoselov L.I. *Transport Urala*, 2014, no. 4, pp. 119-122.
7. Fedotov A.I., Kuznecov N.Ju., Lysenko A.V. et al. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2016, no. 2, pp. 123-127.
8. Fedotov A.I., Kuznecov N.Ju., Lysenko A.V. et al. *Transportnye sistemy Sibiri. Razvitie transportnoj sistemy kak katalizator rosta jekonomiki gosudarstva. Mezhduнародnaja nauchno-praktičeskaja konferencija* [Transport systems of Siberia. Development of the transport system as a catalyst for the growth of the state's economy. International scientific and practical conference]. Krasnoyarsk, 2016, pp. 487-492.
9. Fedotov A.I., Tihov-Tinnikov D.A., Baradiev V.S. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2016, no. 8, pp. 176-181.
10. Kuznecov N.Ju., Lysenko A.V., Tihov-Tinnikov D.A. et al. *Bezopasnost' koljosnyh transportnyh sredstv v uslovijah jekspluatácii. Mezh-*

dunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija [Safety of wheeled vehicles under operating conditions. International scientific and practical conference]. Irkutsk, 2017, pp. 442-451.

11. Fedotov, A I, et al. "Simulation of Car Movement along Circular Path." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, vol. 87, 082018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/8/082018>
12. Lysenko, A V, et al. "Method of Roadholding Control of the Vehicle of Category M 1 under Operating Conditions." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 632, 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/632/1/012046>
13. Kuznecov N.Ju., Fedotov A.I., Lysenko A.V. et al. *Trudy NAMI*, 2019, no. 4, pp. 46-51.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Тихов-Тинников Дмитрий Анатольевич, старший научный сотрудник управления научных исследований, кандидат технических наук, доцент
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
ул. Ключевская, 40В, стр. 1, г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, 670013, Российская Федерация
dm_tt@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Dmitry A. Tikhov-Tinnikov, Senior Researcher at the Research Department, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
East Siberian State University of Technology and Management
40B/1, Klyuchevskaya Str., Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670013, Russian Federation
dm_tt@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0912-4109

Поступила 07.11.2021
После рецензирования 25.11.2021
Принята 05.12.2021

Received 07.11.2021
Revised 25.11.2021
Accepted 05.12.2021