

MEXAHIKA MOSUJIBHBIX MAUUKH

УДК 681.3.06

С.В. ЛЯХОВ, канд. техн. наук Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ МАНЕВРАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫМ ПУТЕМ

В статье рассматривается метод определения параметров динамики движения автомобиля на основе использования датчиков ускорения, позволяющий повысить точность получаемых результатов.

Ключевые слова: параметры динамики автомобиля, управляемость и устойчивость, испытания, датчики ускорения

Введение. Постоянное ужесточение требований к безопасности движения и внедрения систем активной безопасности [1], задача которых минимизация аварийных ситуаций, требует применения все более точных методов оценки параметров динамики движение автомобиля. В настоящее время активно используются такие системы, как система контроля устойчивости (ESP, ESC), система адаптивного круиз-контроля, управления подвеской, внедряется система активного рулевого управления (динамического подруливания). Для получения более достоверной и полной информации о динамике движения автомобиля должны быть охвачены самые разные режимы движения, включающие прямолинейное и криволинейное движение автомобиля при разгоне, равномерном движении и торможении. Одновременно должен определяться целый комплекс параметров: продольные и поперечные ускорения и скорости автомобиля, траектория движения, скорость вращения и угол вращения автомобиля, а также параметры колебания кузова.

Одним из основных вопросов при экспериментальном исследовании динамики движения автомобиля является выбор измерительного оборудования и методики обработки информации. Применяемое в настоящее время измерительное оборудование, используемое в автомобилестроении, по типу датчиков можно разделить на группы: датчики угловой скорости вращения, акселерометры (датчики ускорения), оптические датчики перемещения, датчики на основе

GPS-навигации, а также радары, лидары, видеокамеры и др. [1].

В зависимости от условий применения получаемых данных с датчиков обработка информации делится на два вида: в режиме реального времени и без учета фактора времени. Первая применяется в основном для систем управления. Сложность их применения заключается в ограниченности временного и аппаратного ресурса для расчета, а следовательно, нет возможности применения сложных алгоритмов обработки. Вторая используется для проведения испытаний и исследований, где данные могут быть предварительно сохранены, а затем обработаны алгоритмами любой сложности.

Наиболее удачным примером среди оптических датчиков являются разработки фирмы DATRON Sensor systems GmbH. Для проведения исследований данной фирмой разработаны двухкоординатные датчики перемещения, которые группируются в комплексы в составе измерительной системы [2]. По данным с датчиков перемещения расчетным путем находятся скорости, ускорения и углы вращения автомобиля. Однако шаг записи данных с датчиков имеет большое значение и составляет не менее 0,1 с.

Широко используются системы измерения на основе технологии GPS. Например, в работе [3] описывается исследование движения автобуса на основе использования приемника системы PGS RaceLogic VB20SL3. Стандартная система GPS имеет разрешающую способность в среднем ± 5 м, что недостаточно для определе-

ния траектории движения автомобиля при выполнении маневра. Для повышения точности должна использоваться ее дорогостоящая модификация «Специализированные ЛДПС (локальные дифференциальные подсистемы) геодезического обеспечения» уровня RTK (Real Time Kinematic), использующая технологию, заключающуюся в установке дополнительной, точно привязанной к местности, антенне с корректирующим сигналом [4]. Точность такой системы может достигать уже нескольких сантиметров, но при значительном падении быстродействия. Система способна определять и передавать данные с шагом 0,2-10 с, что недостаточно для оценки динамики автомобиля при высокоскоростных маневрах.

Поэтому системы измерения, использующие датчики ускорения, по-прежнему остаются актуальными. Шаг получаемых данных здесь может быть менее 0,001 с, что важно и для осуществления последующей фильтрации данных.

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси активно проводятся работы по разработке электронных систем управления автомобилей, включающих датчики ускорения. Для их использования разработаны методы и подходы обработки данных в режиме реального времени. В патенте [5] описывается устройство и метод определения буксования колес автомобиля. Метод строится на сравнении данных, полученных с датчиков ускорения и скорости вращения ведущего моста. В работе [6] рассматривается метод определения параметров движения автомобиля для систем контроля устойчивости, в котором для повышения точности рассчитываемых данных используется эталонная модель динамики движения автомобиля с применением фильтра Калмана.

К методам обработки данных, применяемых при испытаниях и исследованиях, можно отнести методы, описанные в патентах [7, 8], в которых проводится расчет динамики движения автомобиля после аварийной ситуации. В патенте [7] для расчета траектории используются данные с датчиков ускорения, где для повышения точности дополнительно применяются данные с датчика скорости движения автомобиля. Расчет производится по данным, записанным от момента прямолинейного движения или в случае, когда автомобиль стоит. Помимо датчиков ускорения для повышения точности в методе, описанном в [8], дополнительно применяются датчики скорости вращения автомобиля. Расчет производится в обратной последовательности, от конечной точки движения автомобиля при аварии до установления начальной точки возникновения аварийной ситуации.

Преимуществом использования датчиков ускорения является минимальное время, затрачива-

емое на установку измерительной системы, ее цена. Недостатком использования является сложность записи и обработки информации, причинами чего выступают:

- большой накладываемый шум на полезный сигнал от работы агрегатов автомобиля;
- погрешность, связанная с креном кузова автомобиля при выполнении маневра и углом наклона испытательной площадки;
- при применяемом численном интегрировании погрешность измерения ускорения приводит к уходу значений рассчитываемой скорости от реальных значений и, в дальнейшем, при повторном интегрировании, для нахождения координат и угла вращения автомобиля, к еще большему уходу рассчитываемых значений.

Поэтому применение датчиков ускорения ставит комплекс задач, как непосредственно связанный с проведением полигонных испытаний, так и последующей обработкой и анализом информации.

Цель работы: разработка метода определения параметров динамики движения автомобиля на основе использования датчиков ускорения, обеспечивающего приемлемую погрешность получаемых значений параметров.

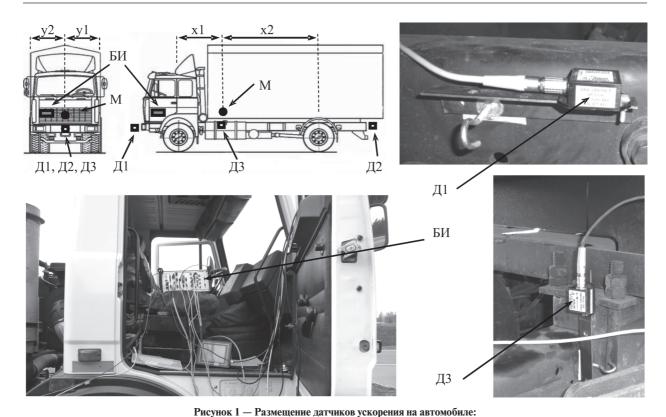
Экспериментальные исследования динамики движения автомобиля и определения его параметров. Разработка методики определения параметров потребовала проведения комплекса лабораторно-дорожных исследований, которые осуществлялись автором на базе Республиканского полигона для испытаний мобильных машин Объединенного института машиностроения НАН Беларуси. Работы проводились в рамках Задания ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия».

В качестве объекта исследований был использован грузовой автомобиль MA3 533702, оборудованный системой измерения CORREVIT µEEP-10. Система измерения включала по два датчика продольного и поперечного ускорения и один вертикального. Запись с датчиков производилась одновременно с шагом 0,001 с. Схема расположения датчиков и их крепление показаны на рисунке 1.

Заезды осуществлялись на четырех типах дорожного покрытия:

- движение на сухом асфальте;
- движение на мокром асфальте;
- движение на мокром базальте с переходом на мокрый асфальт при торможении;
- движение и торможение на покрытии «микст» (одна колея мокрый асфальт, другая мокрый базальт).

Криволинейное движение осуществлялось на испытательном участке, предназначенном для оценки устойчивости автомобиля по радиусу 35 м, согласно СТБ ГОСТ Р 52302-2004 [9]. Однако в отличие от СТБ ГОСТ Р 52302-2004,



M1 — центр масс автомобиля; Д1, Д2 — двухосевые датчики ускорений (передний и задний) расположенные в направлении осей x, y; Д3 — одноосевой датчик ускорения расположенный в направлении оси z; БИ — блок измерения

скорость движения при выполнении маневра поддерживалась постоянной. Заезды проводились, начиная от скорости 10 км/ч с шагом 10 км/ч до скорости 40 км/ч с последующим шагом 5 км/ч до скорости 60 км/ч для снаряженного автомобиля. Далее производилось последовательное уменьшение скорости в обратном порядке.

В ходе проведения заездов были получены выборки с ускорениями, которые дальше подверглись обработке и анализу, положенного в основу разработки методики. Результаты обработки информации показали, что существующая вибрация от работы агрегатов автомобиля, а также уход значений ускорений со временем и углом дорожного покрытия при прохождении маневра, не позволяют добиться приемлемых значений погрешностей, и требуется разработка метода ее компенсации.

Метод компенсации погрешностей и расчета параметров динамики движения автомобиля. В основу компенсации погрешностей автором был положен следующий принцип: начало движения и остановка автомобиля производится с точек с заведомо известными координатами, зная которые, можно точно производить компенсацию возникающих погрешностей при измерении значений ускорений с их последующей математической обработкой. Так, очевидно, что получаемые при интегрировании ускорений с корости автомобиля до начала движения и его окончания должны быть равны нулю, а при повторном интегрировании получаемые конечные

координаты движения должны полностью совпадать с координатами остановки автомобиля на дороге. То же можно сказать и для скорости угла вращения автомобиля и угла его конечного поворота. Исключение погрешностей для рассчитываемых параметров производится добавлением компенсирующих составляющих путем последовательного приближения для всех параметров одновременно, позволяя тем самым добиваться более точной коррекции, исключающей расхождение в точности между параметрами. На рисунке 2 а показана схема выполнения маневра. Автомобиль из точки с координатами, принимаемыми как нулевые, разгоняется на прямолинейном участке и выполняет маневр. После выполнения маневра автомобиль тормозит на прямолинейном участке в точке с координатами, которые в дальнейшем напрямую измеряются относительно точки начала движения. Полученные выборки с ускорениями интегрируются для нахождения скоростей, далее они интегрируются для нахождения траектории движения. Поскольку из-за погрешности измерений ускорения будет наблюдаться отклонение координат точки остановки автомобиля от ее реальных значений, то получаемые значения отклонений Δlx , $\Delta l y$ используются для компенсации погрешностей измерения ускорения Δa (см. рисунок 2 б) и расчета скорости Δv (см. рисунок 2 θ) и координат Δlx , Δly (см. рисунок 2 г). Таким образом, данные, получаемые на участке маневра, будут избавлены от погрешностей.

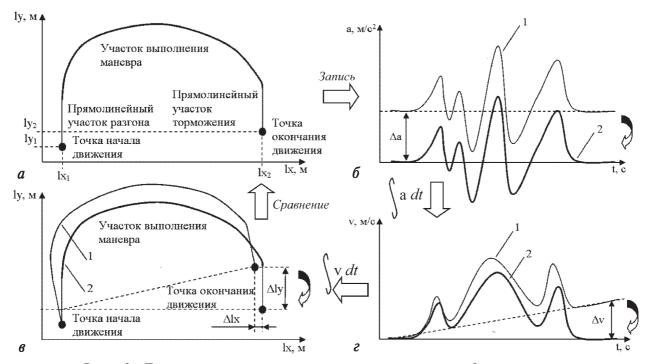


Рисунок 2 — Пример последовательности нахождения параметров движения автомобиля и их коррекции: a — схема проведения маневра с заданными координатами начала и окончания движения; δ — записанные данные по ускорению; s — рассчитанные данные по скоростям; e — рассчитанные данные по координатам (1 — данные без коррекции; 2 — данные с коррекцией; Δa , Δv , $\Delta l x$, $\Delta l y$ — корректирующие значения по ускорению, скорости и координатам)

Используя описанный принцип, были определены следующие этапы проведения расчета нахождения параметров.

1. Первичная фильтрация выборок со значениями ускорений производится методом линейного сглаживания:

$$a_{o_i} = \frac{\sum_{i=i-h}^{i} a_i + \sum_{i=i+h}^{i} a_i}{h \cdot 2 + 2},$$

где i — номер текущего значения в выборке; a_{i} — текущее значение не фильтрованного сигнала в выборке; h — количество точек в окне сглаживания.

2. Для небольших углов поперечного крена кузова устранение гравитационной составляющей поперечных ускорений производится по формуле:

$$a_{y_i} = a_{oy_i} - g\sin(k_1 \cdot a_{oy_i}),$$

где a_{ov_i} — измеренное поперечное ускорение; k_1 — поправочный коэффициент; g — ускорение свободного падения.

- 3. Аналогично проводится коррекция для продольных ускорений.
- 4. Угловое ускорение вращения автомобиля для датчиков, расположенных на продольной оси центра масс, находится:

$$\dot{\Omega}_{i} = \frac{a_{y1_{i}} - a_{y2_{i}}}{x_{1} + x_{2}},$$

где $a_{{\bf y}{\bf l}_i}, \ a_{{\bf y}{\bf l}_i}$ — скорректированные поперечные ускорения переднего и заднего датчиков от гравитационной составляющей; x_1, x_2 — продольные расстояния от центра масс до датчиков ус-

5. Путем интегрирования находится угловая скорость вращения автомобиля:

$$\Omega_i = \dot{\Omega}_i \cdot \Delta t + \Omega_{i-1}$$

где Δt — шаг записи данных по времени.

6. Повторным интегрированием находится угол вращения автомобиля:

$$\varphi_i = \Omega_i \cdot \Delta t + \varphi_{i-1}.$$

7. Поперечное ускорение автомобиля рассчи-

$$a_{\cdot \cdot} = a_{\cdot \cdot \cdot} - \dot{\Omega}_{\cdot \cdot} \cdot x_{\cdot} = a_{\cdot \cdot \cdot} + \dot{\Omega}_{\cdot \cdot} \cdot x_{\cdot}$$

- $a_{y_i}=a_{y1_i}-\dot{\Omega}_i\cdot x_1=a_{y2_i}+\dot{\Omega}_i\cdot x_2.$ 8. Аналогичным образом находится продольное ускорение.
- 9. Поперечная скорость автомобиля рассчитывается:

$$v_{y_i} = (a_{y_i} + \Omega_i \cdot v_{x_i}) \Delta t + v_{y_{i-1}}.$$

10. Продольная скорость автомобиля:

$$v_{x_{\perp}} = (a_{x_{\perp}} - \Omega_i \cdot v_{y_{\perp}}) \Delta t + v_{x_{\perp\perp}}$$

11. Поперечная координата центра масс автомобиля будет:

$$l_{v_i} = (v_{v_i} \cos(\varphi_i) + v_{x_i} \sin(\varphi_i)) \Delta t + l_{v_{i+1}}.$$

12. Продольная координата:

$$l_{x_i} = (v_{x_i} \cos(\varphi_i) - v_{y_i} \sin(\varphi_i)) \Delta t + l_{x_{i-1}}.$$

Исходя из проведенных расчетов, в зависимости от прямолинейного или криволинейного дви-

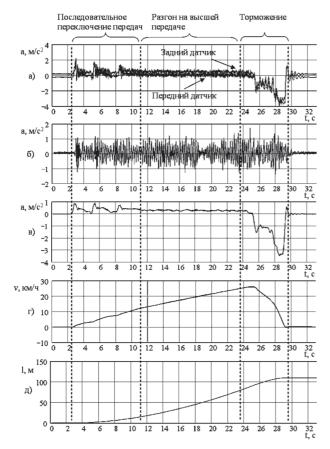


Рисунок 3 — Параметры динамики прямолинейного движения автомобиля (участок дорог — «микст» мокрый асфальт — мокрый базальт): a — записанные продольные ускорения; δ — записанное вертикальное ускорение; ϵ — откорректированные продольные ускорения; ϵ — рассчитанная скорость автомобиля; δ — рассчитанный путь

жения, строится комплекс графиков параметров динамики движения автомобиля. Вид графиков показан на рисунках 3 и 4.

Экспериментальное определение характеристики вертикальных колебаний кузова автомобиля. Экспериментальные и теоретические данные исследований показывают, что форма графика ускорения вертикальных колебаний связана с двумя процессами. Первый — это возбуждение колебаний на собственной частоте от внешних источников энергии, определяемых неровностью дороги, вибрацией агрегатов автомобиля. Второй — это затухание амплитуд колебаний после ударного возбуждения, связанного с разгоном-торможением автомобиля либо с входом-выходом из криволинейного движения.

Идеализированную форму графика ускорения колебаний кузова автомобиля можно описать функцией:

$$a_{z_i} = K_o \frac{\sin(\Delta \omega t_i)}{\omega t_i} \sin(\omega_0 t_i),$$

где K_o — коэффициент величины амплитуды; ω_o — частота собственных колебаний; $\pm \Delta \omega$ — ширина полосы частот колебаний.

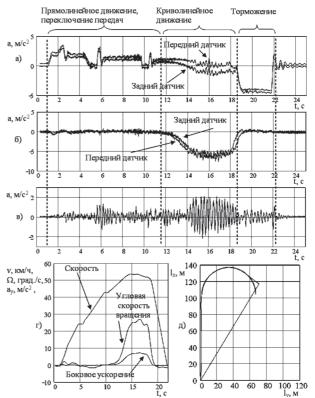


Рисунок 4 — Параметры динамики криволинейного движения автомобиля (участок дорог — радиус 35 м, сухой асфальт, скорость 55 км/ч): a — записанные продольные ускорения; δ — записанные поперечные ускорения; ϵ — записанное вертикальное ускорение; ϵ — рассчитанные параметры курсовой устойчивости автомобиля; δ — рассчитанная траектория движения

Член
$$K_o \frac{\sin(\Delta \omega t_i)}{\omega_o t_i}$$
 характеризует амплитуду и

время ее затухания.

1. Амплитудно-частная характеристика ускорения собственной частоты колебаний кузова находится разложением исходной выборки (первоначально отняв ускорение свободного падения) на гармонические составляющие согласно теореме Фурье. Амплитуда получаемых гармоник в комплексном виде будет:

$$m_k = \left| h_k + j \cdot g_k \right| \frac{2}{N}; \ h_k = a_{z_i} \cos(2\pi \frac{k \cdot i}{N});$$
$$g_k = a_{z_i} \sin(2\pi \frac{k \cdot i}{N}), \ j = \sqrt{-1},$$

где h_k — действительная часть числа; g_k — мнимая часть числа; a_{z_i} — текущее значение вертикального ускорения; k — номер гармоники; N — количество значений в выборке; j — мнимая единица.

После этого строится характеристика (рисунок 5), где по горизонтальной оси откладываются номера гармоник, умноженные на число значений в выборке и деленные на шаг времени выборки, а по вертикальной оси откладываются амплитуды гармоник.

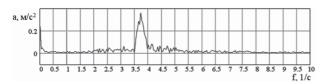


Рисунок 5 — Амплитудно-частотная характеристика собственной частоты колебаний ускорения (участок дорог — радиус 35 м, сухой асфальт, скорость 50 км/ч)

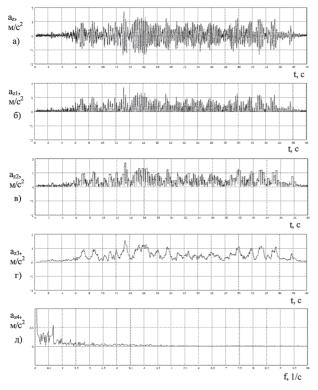


Рисунок 6 — Этапы нахождение амплитудно-частотной характеристики ускорения собственных колебаний от ударного возбуждения: a — исходная выборка с вертикальным ускорением; δ — выборка с обрезанными отрицательными значениями; ϵ — выборка с амплитудами колебаний; ϵ — выборка со сглаженными экспоненциальным фильтром амплитудами; δ — спектр колебаний

2. Частотная характеристика изменения амплитуд колебаний ускорения после ударного возбуждения находится следующим путем.

Для имеющейся выборки вертикальных ускорений (рисунок 6 a) проводится обрезание отрицательных значений (см. рисунок 6 δ):

$$\left. \begin{array}{l} a_{z1_i} = a_{z_i}, a_{z_i} > 0 \\ a_{z1_i} = 0, a_{z_i} \leq 0 \end{array} \right\}.$$

Используя полученную выборку, строится выборка с амплитудами для каждого периода колебаний (см. рисунок 6 θ):

$$\left. \begin{array}{l} a_{z2_{i}} = a_{z1_{i}}, a_{z1_{i-1}} < a_{z1_{i}} \\ a_{z2_{i}} = a_{z2_{i-1}}, a_{z1_{i-1}} \geq a_{z1_{i}} \end{array} \right\}.$$

Далее проводится сглаживание выборки экспоненциальным фильтром (см. рисунок 6 ϵ):

$$a_{z3_i} = a_{z3_{i-1}} + (a_{z2_{i-1}} - a_{z3_{i-1}})(1 - \exp(\frac{-i}{\tau}))\frac{N}{i},$$

где τ — постоянная времени, выбираемая исходя из необходимой степени сглаживания выборки.

Для нахождения спектра изменения амплитуд колебаний ускорения от ударного возбуждения выборка подвергается разложению на гармоники аналогично, как для нахождения собственной частоты колебаний (см. рисунок $6 \ \partial$).

Используя данную методику, была разработана программа в среде математических вычислений MathCAD, дающей возможность автоматизации проведения расчета параметров. На основе полученных характеристик проведен анализ динамики движения автомобиля MA3 и верификация разрабатываемых математических моделей, используемых для анализа и синтеза систем активной безопасности коммерческого автотранспорта [10, 11].

Заключение. Проведен комплекс экспериментальных исследований динамики движения автомобиля в условиях полигонных испытаний, позволивший обосновать требования к определению параметров движения расчетным путем с использованием данных продольных и поперечных ускорений.

На основании требований предложен метод определения параметров движения автомобиля для оценки его поперечной и курсовой устойчивости. Положительные результаты применения метода подтверждаются сравнительными данными, полученными при математическом моделировании движения автомобиля при аналогичных условиях.

Использование метода позволяет отказаться от применения дополнительных датчиков для коррекции данных с датчиков ускорения. Коррекция производится расчетным путем за счет априорных данных начальных и конечных координат расположения автомобиля, угла его поворота и состояния движения на участках до и после выполнения маневра.

Метод также включает определение амплитудно-частотной характеристики ускорения вертикальных колебаний кузова автомобиля, где наряду с определением собственной частоты колебаний находятся частоты изменения амплитуд колебаний ускорения от ударного возбуждения при разгоне-торможении или криволинейном движении. Тем самым обеспечивается возможность рассматривать процесс колебания с одновременным сопоставлением с параметрами движения автомобиля.

Список литературы

- 1. Ляхов, С.В. Современное состояние международных норм оценки систем контроля устойчивости (ESC) автотранспортных средств / С.В. Ляхов // Механика машин, механизмов и материалов. Минск, 2010. № 4(13). С. 24—28.
- 2. Общая информация о фирме CORRSYS-DATRON Sensor systeme GmbH и её продукции [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.sensorika.com/content/view/87/82/.

- Исследование тормозных свойств автобуса по результатам компьютерного моделирования и данных дорожных испытаний [Электронный ресурс] / А.М. Грошев [и др.]. — Режим доступа: http://www.nntu.ru/trudy/2012/03/157—161.pdf.
- Клочков, А.В. Возможности применения курсоуказателей с системой GPS [Электронный ресурс] / А. В. Клочков, А.Е Маркевич. — Режим доступа: http://agriculture.by/?p=2136.
- Устройство определения величины буксования движителей мобильных машин: пат. № 4737 Респ. Беларусь, МПК G 01М 17/00, В 60R 16/02 / В.Н. Басалаев, В.В. Михайлов, В.Б. Альгин [и др.]; заявитель ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси». № и 2008129; заявл. 19.02.08; опубл. 30.10.08.
- Широков, Б. Н. Оценка боковой скорости автомобиля с использованием фильтра Калмана для контроля устойчивости и управляемости в современных системах активной безопасности / Б. Н. Широков, В. М. Сорочан, В. Б. Альгин // Сб. науч. тр. МНТК «Инновации в машиностроении-2012». 2012. С. 320—323.
- Способ построения пространственной траектории движения транспортного средства по зарегистрированным дан-

- ным и устройство для его осуществления: пат. РФ № 2193989 [Электронный ресурс] / В.А. Лукин, В.В. Клюкинских, Ю.Б. Зонов [и др.]. Режим доступа: http://www.freepatent.ru/patents/2193989.
- Способ восстановления скорости и траектории движения транспортного средства по зарегистрированным данным при дорожно-транспортном происшествии и устройство для его осуществления: пат РФ № 2232097 [Электронный ресурс] / В.О. Доронин, Ю.Ф. Титов. — Режим доступа: http://www.freepatent.ru/patents/2232097.
- Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний: СТБ ГОСТ Р 52302-2004.
- Ляхов, С.В. Математическая модель и программное обеспечение для оценки систем контроля устойчивости грузовых автомобилей и автобусов / С.В. Ляхов // Механика машин, механизмов и материалов. 2011. № 4(17). С. 24—28.
- Ляхов, С.В. Моделирование сцепления колеса с опорной поверхностью в контексте оценки устойчивости движения автомобиля / С.В. Ляхов, Б.Н. Широков // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 4. — С. 26–32.

Liakhov S.V.

Estimation of vehicle dynamics parameters via the fusion of experimental and computational approaches

The paper proposes the methodology of the estimation of vehicle dynamics parameters based on the signals from acceleration sensors. The proposed method allows to improve an accuracy of the obtained results using the fusion of experimental and computational approaches.

Keywords: vehicle dynamics parameters, handling and stability, testing, acceleration sensors