

Машиностроение и машиноведение

УДК 62-567.7; 62-503.57

doi: 10.18698/0536-1044-2021-6-3-12

Адаптивное управление амортизатором с магнитореологической жидкостью в подвеске автомобиля

С.П. Круглов¹, И.А. Заковырин²¹ ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»² ООО «ИТЦ Альтер Энерго»

Adaptive Control of the Shock Absorber with Magnetorheological Fluid in the Car Suspension

S.P. Kruglov¹, I.A. Zakovyrin²¹ Irkutsk State Transport University² Engineering and Technical Center Alter Energo Ltd.

К недостаткам систем управления подвеской автомобиля относится их неспособность функционировать при неопределенности параметров подвески и внешних возмущений, а также невозможность быстрого парирования последних. Предложен новый алгоритм управления подвеской, способный снижать воздействия на корпус автомобиля со стороны дороги и силовые инерционные воздействия при неопределенности указанных параметров. Алгоритм, являющийся адаптивным, построен на основе параметрической идентификации математической модели объекта управления, осуществляемой системой управления в реальном времени, а также на использовании неявной эталонной модели. В качестве управляемого элемента выступает амортизатор с магнитореологической жидкостью, способный изменять степень демпфирования подвески. На примере двухмассовой модели подвески «четверть автомобиля» проведено исследование эффективности разработанного алгоритма в сравнении с пассивной подвеской. Результаты исследования показали способность предлагаемого адаптивного закона управления подвеской функционировать в условиях текущей априорной неопределенности, улучшая ее свойства в диапазоне низких частот, наиболее важном с точки зрения обеспечения комфорта водителю и пассажирам.

Ключевые слова: управляемая подвеска, полуактивная система управления подвеской, магнитореологическая жидкость, алгоритмы управления, адаптивный закон управления

The disadvantages of car suspension control systems include their inability to function with uncertainty of the suspension parameters and external disturbances, as well as the impossibility of quickly countering the latter. A new suspension control algorithm is proposed, which is able to reduce the impacts on the vehicle body from the road as well as inertial forces under the uncertainty of these parameters. The algorithm is adaptive and is based on the parametric identification of the mathematical model of the controlled object, performed by the control system in real time, and also on the use of an implicit reference model.

A shock absorber with a magnetorheological fluid acts as a controlled element, which is capable of changing the degree of suspension damping. On the example of a two-mass model of the "quarter car" suspension, a model study of the effectiveness of the developed algorithm in comparison with a passive suspension was carried out. The results of the study showed the ability of the proposed adaptive suspension control algorithm to function under the current a priori uncertainty, improving the properties of the suspension in the low frequency range, which is most important for ensuring comfortable conditions for the driver and passengers.

Keywords: controlled suspension, semi-active suspension control system, magnetorheological fluid, control algorithms, adaptive control law

Внешние возмущения, действующие на подвеску автомобиля, бывают кинематическими и силовыми. Первые, обусловленные неровностями дороги, — возмущения на подвеску со стороны колеса. Вторые связаны с инерционными свойствами кузова автомобиля при маневрировании, т. е. это возмущения на подвеску со стороны корпуса автомобиля. Цель подвески — бороться с нежелательными проявлениями обоих видов возмущений.

В настоящее время на смену пассивным (неуправляемым) подвескам с фиксированными параметрами приходят управляемые, имеющие собственную систему управления. Для современного автомобиля такому решению уже нет альтернативы [1].

Существующие и рассматриваемые в публикациях системы управления подвеской, как правило, построены на основе исходной (во время создания системы) осредненной информации о параметрах автомобиля, подвески и внешних возмущениях или эпизодической корректировки этой информации путем переключения режимов работы подвески.

Однако в конкретных условиях эксплуатации автомобиля такая информация, заложенная в систему управления подвеской, может существенно отличаться от реальной. Это приводит к снижению эффективности управления подвеской.

Цель работы — устранение указанного недостатка путем формирования непрерывной полупассивной системы управления подвеской с магнитоореологической жидкостью (МРЖ), построенной на адаптивном законе управления и работающей в условиях текущей неопределенности.

Закон управления построен на схеме с текущим оцениванием параметров подвески, автомобиля и возмущений, с назначением неявной эталонной модели, а также с использованием «упрощенных» условий адаптивности [2].

Управление направлено на снижение влияния кинематических и силовых возмущений подвески.

Работа является логическим продолжением публикации [3], где показано преимущество подобного адаптивного алгоритма перед методом мгновенного переключения [4, 5], способного функционировать в названных условиях текущей неопределенности. Определены свойства рассматриваемой подвески: частотные характеристики, способность парировать кинематические и силовые возмущения. Исследован отрыв колеса от дорожного полотна.

Исходные постановки. Для исследования свойств подвески можно использовать ее широко известную двухмассовую одноопорную математическую модель, приведенную к одному колесу автомобиля с присоединенной массой в «четверть автомобиля» [5]. Эта модель схематично показана на рис. 1, где введены следующие обозначения: m_{Π} — масса автомобиля, присоединенная к одному колесу (поддрессоренная масса); $m_{\text{н}}$ — масса одного колеса (неподдрессоренная масса); z_{Π} и $z_{\text{н}}$ — линейные перемещения поддрессоренной и неподдрессоренной

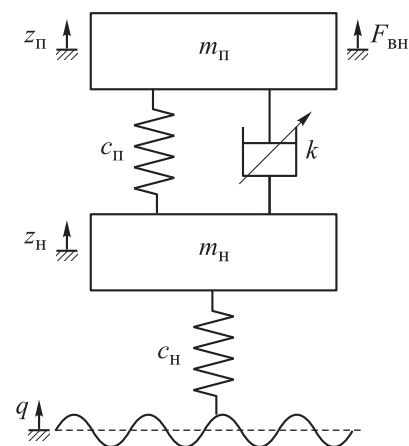


Рис. 1. Модель двухмассовой одноопорной подвески «четверть автомобиля»

ренной массы; c_{π} и $c_{\text{н}}$ — коэффициент жесткости пружины амортизатора и колеса; k — регулируемый коэффициент демпфирования амортизатора; q — кинематическое возмущение на подвеску; $F_{\text{вн}}$ — внешняя сила, действующая на подвеску вследствие силового возмущения.

Модель, описывающую движение подвески с МРЖ в отклонениях от установившегося положения при использовании модифицированной модели Даля [6], можно представить в виде

$$\begin{cases} m_{\pi} \ddot{z}_{\pi} = c_{\pi} (z_{\text{н}} - z_{\pi}) + F_{\text{МРЖ}} + F_{\text{вн}}; \\ m_{\text{н}} \ddot{z}_{\text{н}} = -c_{\pi} (z_{\text{н}} - z_{\pi}) - F_{\text{МРЖ}} - c_{\text{н}} (z_{\text{н}} - q); \\ \dot{z}_{\pi}(t_0) = 0; \\ z_{\pi}(t_0) = 0; \\ \dot{z}_{\text{н}}(t_0) = 0; \\ z_{\text{н}}(t_0) = q(t_0) = 0; \\ F_{\text{МРЖ}} = (k_{za} + k_{zb}u)(\dot{z}_{\text{н}} - \dot{z}_{\pi}) + (k_{wa} + k_{wb}u)w; \\ \dot{w} = \sigma(\dot{z}_{\text{н}} - \dot{z}_{\pi})[1 - \text{sign}(\dot{z}_{\text{н}} - \dot{z}_{\pi})w], \quad w(t_0) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $F_{\text{МРЖ}}$ — сила демпфирования МРЖ, регулируемая управляющим сигналом u , который представляет собой входное напряжение постоянного тока; k_{za} , k_{zb} , k_{wa} , k_{wb} , σ — постоянные коэффициенты, определяющие силу демпфирования и вид гистерезиса в зависимости от управляющего сигнала u ; w — безразмерная гистерезисная переменная; t_0 — начальный момент текущего времени t .

Считаем, что параметры модели c_{π} , $c_{\text{н}}$, k_{za} , k_{wa} и функции $q(t)$, $F_{\text{вн}}(t)$, $w(t)$ на момент формирования управления являются неизвестными, параметры m_{π} , k_{zb} , k_{wb} , σ — приблизительно известными (что пояснено далее), а необходимые для текущей идентификации и синтеза закона управления переменные \ddot{z}_{π} , $(\dot{z}_{\text{н}} - \dot{z}_{\pi})$, $(z_{\text{н}} - z_{\pi})$ — непосредственно измеряемыми.

К причинам неопределенности параметров для синтеза текущего закона управления подвеской относятся разная загрузка автомобиля, сезонная смена внешней температуры, эксплуатационный износ и пр. Даже естественное повышение температуры подвески от функционирования может дать значительное изменение ее параметров [4].

Синтез адаптивного закона управления. В соответствии с предлагаемым методом построения адаптивного управления и его нацеленностью на гашение колебаний подрессоренной

массы представим первое выражение системы уравнений (1) в виде

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{\pi} - \left[\frac{k_{zb}}{m_{\pi}} (\dot{z}_{\text{н}} - \dot{z}_{\pi}) + \frac{k_{wb}}{m_{\pi}} w \right] u = \\ = \frac{c_{\pi}}{m_{\pi}} (z_{\text{н}} - z_{\pi}) + \frac{k_{za}}{m_{\pi}} (\dot{z}_{\text{н}} - \dot{z}_{\pi}) + \frac{k_{wa}}{m_{\pi}} w + \frac{F_{\text{вн}}}{m_{\pi}} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} z = \frac{c_{\pi}}{m_{\pi}} (z_{\text{н}} - z_{\pi}) + \frac{k_{za}}{m_{\pi}} (\dot{z}_{\text{н}} - \dot{z}_{\pi}) + \\ + \frac{k_{wa}}{m_{\pi}} w + \frac{F_{\text{вн}}}{m_{\pi}} = \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{y}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\boldsymbol{\theta}^T$ — вектор неизвестных параметров математической модели (2), которую будем воспринимать как модель объекта управления; \mathbf{y}^T — вектор переменных, верхний индекс «Т» указывает на транспонирование.

В выражении (2):

$$z \triangleq \ddot{z}_{\pi} - [\theta_{01} (\dot{z}_{\text{н}} - \dot{z}_{\pi}) + \theta_{02} w] u;$$

$$\boldsymbol{\theta}^T \triangleq [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4];$$

$$\mathbf{y}^T \triangleq [y_1, y_2, y_3, y_4],$$

где

$$\theta_{01} \triangleq k_{zb}/m_{\pi}; \quad \theta_{02} \triangleq k_{wb}/m_{\pi}; \quad \theta_1 = c_{\pi}/m_{\pi};$$

$$\theta_2 = k_{za}/m_{\pi}; \quad \theta_3 = k_{wa}/m_{\pi}; \quad \theta_4 = F_{\text{вн}}/m_{\pi};$$

$$y_1 = (z_{\text{н}} - z_{\pi}); \quad y_2 = (\dot{z}_{\text{н}} - \dot{z}_{\pi}); \quad y_3 = w; \quad y_4 = 1.$$

Заметим, что другие уравнения системы (1) в модели (2) присутствуют неявно в виде переменных $\dot{z}_{\text{н}}$, $z_{\text{н}}$, w .

Для поиска неизвестных параметров θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 в текущем времени (оценки θ_{01} , θ_{02} , σ будут назначены далее) используем рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [7]:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\theta}}_i = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{i-1} + \mathbf{P}_i \mathbf{y}_i \boldsymbol{\varepsilon}_i; \\ \boldsymbol{\varepsilon}_i = z_i - \hat{\boldsymbol{\theta}}_{i-1}^T \mathbf{y}_i; \\ \mathbf{P}_i = \tilde{\mathbf{P}}_{i-1} - \tilde{\mathbf{P}}_{i-1} \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^T \tilde{\mathbf{P}}_{i-1} (1 + \mathbf{y}_i^T \tilde{\mathbf{P}}_{i-1} \mathbf{y}_i)^{-1}; \\ \tilde{\mathbf{P}}_{i-1} = \mathbf{P}_{i-1} / \beta_{\text{заб}}; \\ \mathbf{P}_0 = \mathbf{E}_4 \gamma; \quad \gamma \rightarrow +\infty, \end{cases} \quad (3)$$

где $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i$ и $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{i-1}$ — вектор искомых оценок в i -й и $(i-1)$ -й дискретные моменты времени, $i = 1, 2, 3, \dots$; символ « \wedge » помечает параметры оценки; \mathbf{P}_i и \mathbf{P}_{i-1} — матрицы ковариации оценивания ошибок в i -й и $(i-1)$ -й моменты вре-

мени; ε_i — невязка идентификации; z_i — текущее значение величины z по модели (2); \mathbf{P}_{i-1} — матрица ковариации оценивания ошибок, учитывающая коэффициент забывания, в $(i-1)$ -й момент времени; $\beta_{\text{заб}}$ — параметр забывания прошлых измерений, позволяющий отслеживать переменные параметры и удовлетворяющий соотношениям $0 < \beta_{\text{заб}} < 1$ и $\beta_{\text{заб}} \rightarrow 1$; \mathbf{P}_0 — начальное значение матрицы \mathbf{P} ; \mathbf{E}_4 — единичная матрица размером 4×4 ; γ — назначаемое большое положительное число.

Для повышения устойчивости работы алгоритма в реальных условиях (характеризуемых линейной зависимостью переменных, необеспеченностью «богатства» входного сигнала и влиянием шумов измерений) рекомендовано использовать модификации указанного алгоритма, описанные, например, в работе [8].

Для формирования заданных свойств замкнутой системы управления с целью гашения колебаний подрессоренной массы используем неявную эталонную модель, которая по физике движений подвески соответствует колебательному звену [9]:

$$\ddot{z}_m = a_{m1}\dot{z}_m + a_{m0}z_m; \quad \dot{z}_m(t_0) = 0; \quad z_m(t_0) = 0, \quad (4)$$

где z_m — выход эталонной модели, соответствующий переменной z_n ; $a_{m1} = -2\omega_m\xi_m$ (ω_m — собственная частота модели; ξ_m — относительный коэффициент затухания модели); $a_{m0} = -\omega_m^2$.

Так как эталонная модель неявная, ее начальные условия совпадают с таковыми для объекта управления.

Если считать параметры модели (2) известными, то, приравнявая правую часть первого равенства (4) с \ddot{z}_n по (2) и заменяя в первом z_m на z_n и \dot{z}_m на \dot{z}_n , можно найти управляющее воздействие на подвеску (которое назовем точным)

$$u^* = \frac{a_{m1}\dot{z}_n + a_{m0}z_n - \theta_1(z_n - z_n) - \theta_2(\dot{z}_n - \dot{z}_n) + \theta_3w + \theta_4}{\theta_{01}(\dot{z}_n - \dot{z}_n) + \theta_{02}w} \quad (5)$$

при условии, что знаменатель не равен нулю.

После подстановки соотношения (5) в формулу (2) получим динамику замкнутой системы управления, тождественной эталонной модели (4).

Так как параметры объекта управления неизвестны, реальный закон управления будет

построен не на соотношении (5), а на текущих оценках, доставляемых алгоритмом идентификации (3) и оценки $\hat{w}(t)$. С учетом указанных ограничений назначения оценок $\hat{\theta}_{01}$, $\hat{\theta}_{02}$, $\hat{\sigma}$ (показано далее) и элементарных преобразований выражения для w согласно системе (1) запишем этот закон в виде

$$\left\{ \begin{aligned} u &= \text{sat}_{0u_{\max}} \left(\frac{a_{m1}\dot{z}_n + a_{m0}z_n - \hat{\theta}_1(z_n - z_n)}{\text{sat}_{|\cdot|_{\min}} [\hat{\theta}_{01}(\dot{z}_n - \dot{z}_n) + \hat{\theta}_{02}\hat{w}]} - \frac{\hat{\theta}_2(\dot{z}_n - \dot{z}_n) + \hat{\theta}_3\hat{w} + \hat{\theta}_4}{\text{sat}_{|\cdot|_{\min}} [\hat{\theta}_{01}(\dot{z}_n - \dot{z}_n) + \hat{\theta}_{02}\hat{w}]} \right); \quad (6) \\ (|\dot{z}_n - \dot{z}_n|\hat{\sigma})^{-1} \hat{w} + \hat{w} &= \text{sign}(\dot{z}_n - \dot{z}_n), \end{aligned} \right.$$

где $\text{sat}_{0u_{\max}}[\cdot]$ — функция ограничения аргумента диапазоном $0 \dots u_{\max}$; $\text{sat}_{|\cdot|_{\min}}(\cdot)$ — функция ограничения аргумента минимальным значением его модуля.

Заметим, что оценка $\hat{w}(t)$ может формироваться путем пропускания сигнала $\text{sign}(\dot{z}_n - \dot{z}_n)$ через апериодическое звено с единичным коэффициентом усиления и изменяющейся во времени постоянной времени звена $(|\dot{z}_n - \dot{z}_n|\hat{\sigma})^{-1}$. Коэффициент σ — обычно большое число (более 100 м^{-1}), поэтому $w \cong \text{sign}(\dot{z}_n - \dot{z}_n)$, и при большом разбросе значений оценки $\hat{\sigma}$ около точного значения (до нескольких десятков процентов; предположим далее, что это выполнено) оценка $\hat{w}(t)$ определяется с точностью до нескольких процентов.

Как следует из выводов, сделанных в работе [2], с учетом близости оценки $\hat{w}(t)$ истине, а также при условии, что переменные находятся внутри указанных в системе уравнений (6) ограничений, свойства замкнутой системы управления с темпом сходимости к нулю невязки идентификации (ее скорость сходимости гораздо выше, чем у оценок к точным значениям) будут приближаться к свойствам назначенного эталона, если выполнены следующие условия:

$$\left\{ \begin{aligned} \text{sign}\hat{\theta}_{01} &= \text{sign}\theta_{01} \quad \text{при } 0,5|\theta_{01}| < |\hat{\theta}_{01}| < 2|\theta_{01}|; \\ & d\hat{\theta}_{01}/dt \rightarrow 0; \\ \text{sign}\hat{\theta}_{02} &= \text{sign}\theta_{02} \quad \text{при } 0,5|\theta_{02}| < |\hat{\theta}_{02}| < 2|\theta_{02}|; \\ & d\hat{\theta}_{02}/dt \rightarrow 0. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Из определения параметров θ_{01} , θ_{02} по модели (2) для выполнения условий (7) достаточно приблизительно знать коэффициенты k_{zb} , k_{wb}

и массу автомобиля. В связи с этим предлагается оценки $\hat{\theta}_{01}, \hat{\theta}_{02}$ назначить постоянными с обеспечением условий (7) и исключить из процедуры идентификации, что и сделано в выражении (3).

Модельный пример. Исследования проведены в среде MATLAB/Simulink. Имитационная модель построена по уравнениям (1), (3), (6) с учетом обозначений (2) и (4). Параметры модели подвески по уравнениям (1) выбраны для типовой конфигурации автомобиля и регулируемой подвески с МРЖ: $c_n = 21\ 000$ Н/м; $c_n = 215\ 000$ Н/м; $m_n = 330$ кг; $m_n = 50$ кг; коэффициенты модифицированной модели Дала: $k_{za} = 2000$ Н·с/м; $k_{zb} = 850$ кг/(В·с); $k_{wa} = 20$ Н; $k_{wb} = 130$ Н/В; $\sigma = 300$ м⁻¹.

Для указанных параметров коэффициент демпфирования при нулевом управляющем сигнале составляет около 2000 Н·с/м (условие неуправляемой подвески), а приращение коэффициента демпфирования достигает 5000 Н·с/м при изменении управляющего напряжения от 0 до $u_{max} = 5$ В. Заметим, что здесь рассмотрено автоматическое изменение свойств магнитореологического демпфера только в сторону увеличения коэффициента демпфирования относительно нерегулируемого состояния.

Зависимости силы демпфирования $F_{МРЖ}$ от разности линейных скоростей неподрессоренной и поддрессоренной массы $(\dot{z}_н - \dot{z}_п)$ при управляющем сигнале $u = 0$ и 5 В приведены на рис. 2. Параметры гистерезиса близки к показателям, в частности, полученным на основе эксперимента и описанным в работе [10].

Указанные параметры соответствуют стандартной модели подвески автомобиля [11], а параметры — магнитореологическому амортизатору [10, 12]. Результирующий относительный диапазон изменения коэффициента демпфирования подвески равен 2,5.

Для реализации предлагаемого адаптивного алгоритма управления принято следующее. Параметры алгоритма идентификации (3): $\beta_{заб} = 0,98$; $\gamma = 100$. Для формирования сигнала z_i по модели (2) в алгоритме (3) использован сигнал \hat{w}_i . Он же применен в качестве переменной y_3 . Временной шаг дискретности алгоритма идентификации составлял 0,001 с. С этим же шагом вычислялся в дискретной форме закон управления (6).

Параметры эталонной модели (4): $\omega_m = 10$ рад/с; $\xi_m = 0,9$. Это соответствует хорошей

задемпфированности колебаний. Принято, что $\hat{\theta}_{01} \equiv 1,8k_{zb}/m_n$, $\hat{\theta}_{02} \equiv 0,6k_{wb}/m_n$ и $\hat{\sigma} = 500$ м⁻¹ (другие значения из диапазона (7), которые можно отнести и к последней оценке, практически не влияют на качество управления). Параметры закона управления (6): $sat_{|min} = 0,1$. Динамика системы управления моделировалась звеном запаздывания 0,003 с.

Исследования проведены в виде сравнения качества демпфирования указанных возмущений подвеской при ее работе в неуправляемом режиме ($u \equiv 0$) и с предлагаемым адаптивным управлением по выражениям (3), (4) и (6). Проанализировано снижение линейных перемещений поддрессоренной массы и ее ускорений, а также отрыв колеса от дорожного полотна. Для определения последнего введем понятие показателя сцепления колеса с до-

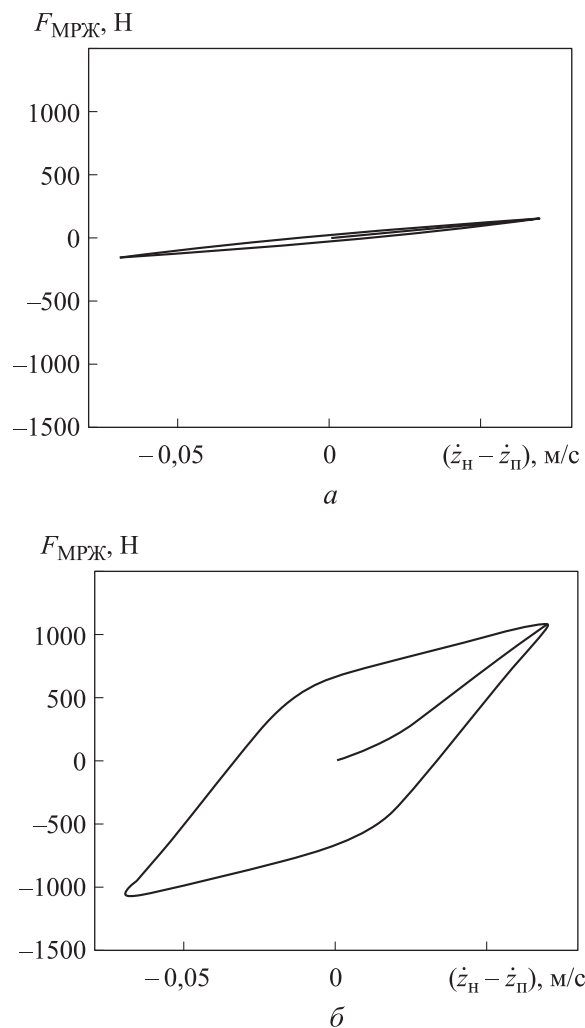


Рис. 2. Зависимости силы демпфирования $F_{МРЖ}$ от разности линейных скоростей неподрессоренной и поддрессоренной массы $(\dot{z}_н - \dot{z}_п)$ при управляющем сигнале $u = 0$ (а) и 5 В (б)

рожным полотном ($z_n - q$), который должен удовлетворять очевидному неравенству

$$(z_n - q) < \frac{(m_n + m_n)g}{c_n} \approx 0,017 \text{ м}, \quad (8)$$

где g — ускорение свободного падения.

Чем меньше величина ($z_n - q$), тем лучше сцепление колеса с дорожным полотном.

Результаты исследования воздействия внешней силы на корпус автомобиля, соответствующей маневру «смена полосы движения», приведены на рис. 3. Реакция неуправляемой подвески обозначена кривой серого цвета, а управляемой — черного цвета. Штрихпунктирной линией на рис. 3, *e* показано значение показателя из соотношения (8), соответствующее физическому отрыву колеса от дорожного полотна. Анализ рис. 3 свидетельствует о существенном снижении отклонения корпуса авто-

мобиля с регулируемой подвеской по сравнению с нерегулируемой.

Амплитудно-частотные характеристики неуправляемой и управляемой подвесок как реакции по частотам f на гармоническое кинематическое воздействие со стороны дороги с амплитудой 0,05 м приведены на рис. 4. Дискретность исследования — 3 рад/с. Штрихпунктирной линией показано значение показателя сцепления, соответствующее отрыву колеса от дорожного полотна.

Графики свидетельствуют о значительном снижении перемещений, поддресоренной массы, ее ускорений и сцепления колеса с дорожным полотном в диапазоне частот 4...13 рад/с, наиболее важном с точки зрения обеспечения комфорта водителю и пассажирам [13].

Реакции неуправляемой и управляемой подвесок на кинематическое воздействие в виде

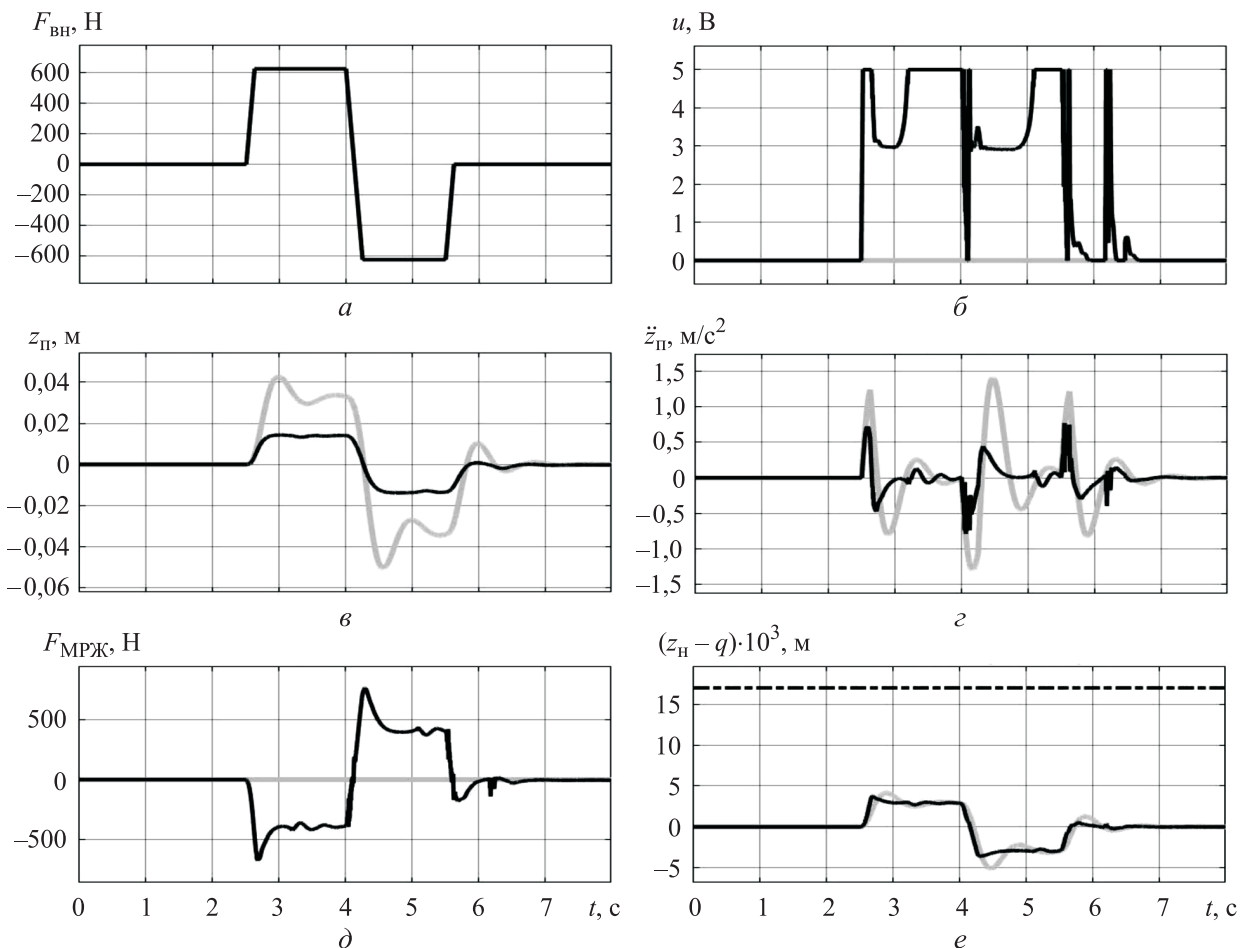


Рис. 3. Результаты исследования воздействия внешней силы на корпус автомобиля, соответствующей маневру «смена полосы движения», при использовании неуправляемой (—) и управляемой (—) подвесок:

a и *б* — зависимости внешней силы $F_{вн}$ и управляющего сигнала u от времени t ;
в–е — временные зависимости линейного перемещения поддресоренной массы z_n , ее ускорения \ddot{z}_n , силы демпфирования $F_{МРЖ}$ и показателя сцепления колеса с дорожным полотном $(z_n - q)$ соответственно

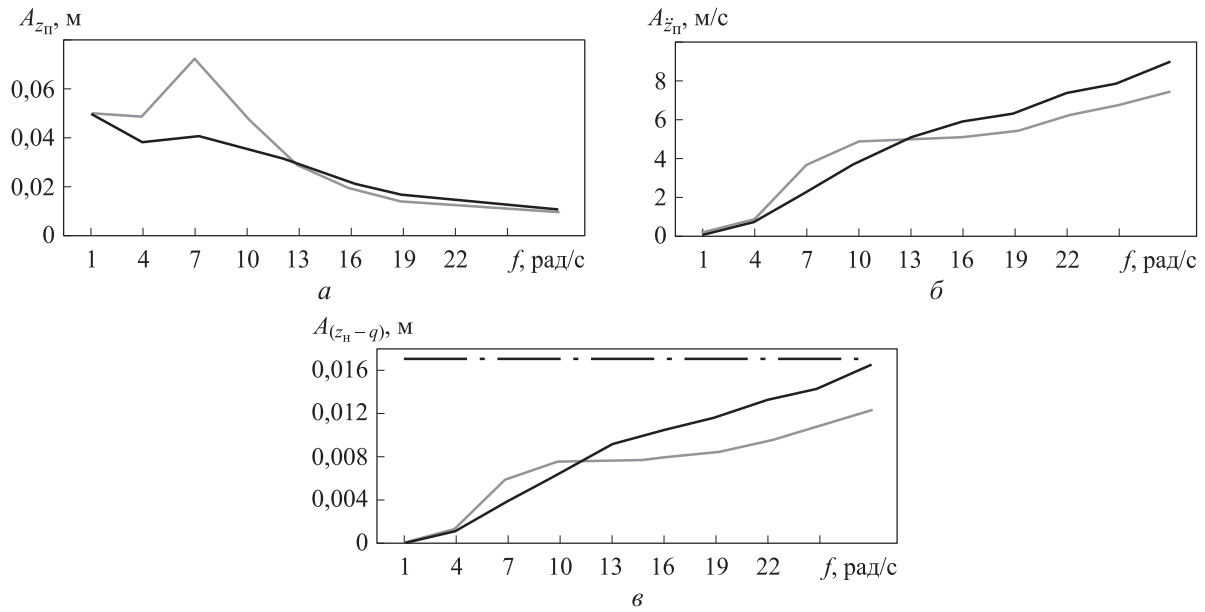


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики исследуемых параметров при гармоническом кинематическом воздействии со стороны дороги на неуправляемую (—) и управляемую (---) подвески: а — амплитуды линейного перемещения поддрессоренной массы A_{z_n} ; б — амплитуды ускорения поддрессоренной массы $A_{\ddot{z}_n}$; в — амплитуды сцепления колеса с дорожным полотном $A_{(z_n-q)}$

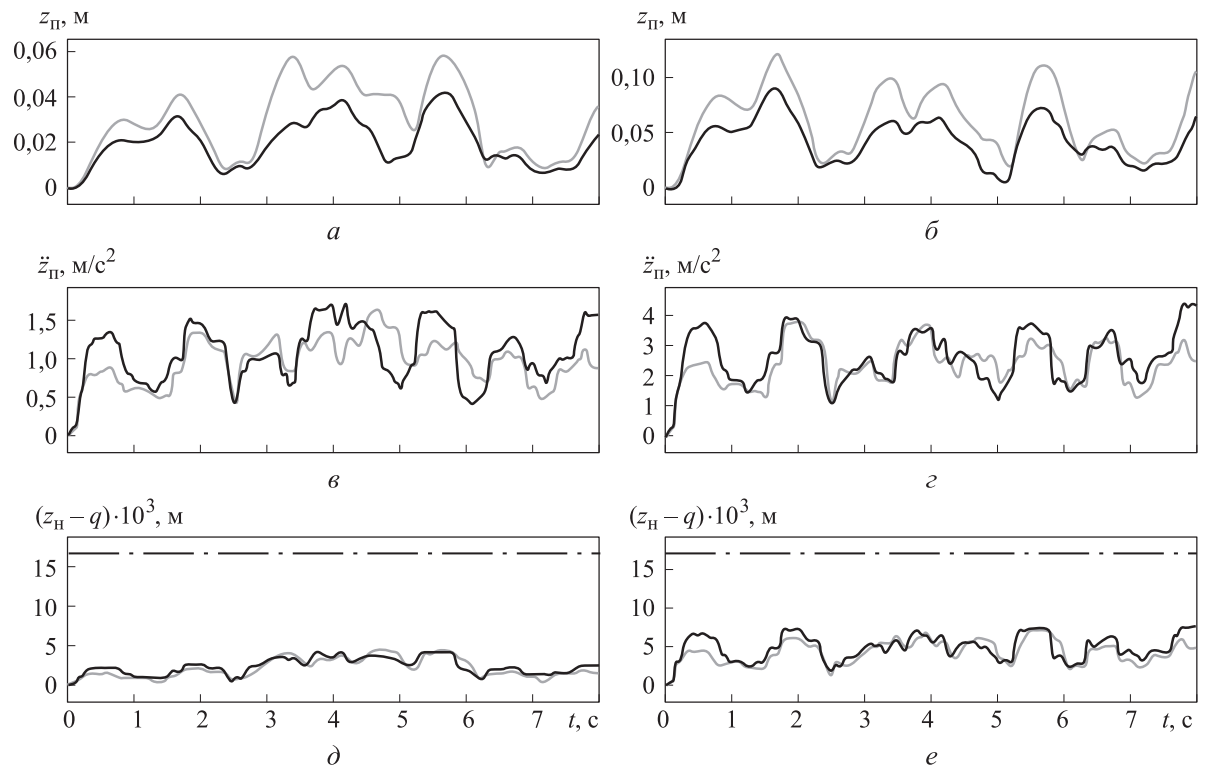


Рис. 5. Зависимости исследуемых параметров от времени t при случайном кинематическом воздействии, имитирующем движение автомобиля с неуправляемой (—) и управляемой (---) подвесками по реальной дороге со скоростью 5 (а, в, д) и 40 м/с (б, г, е): а, б — линейных перемещений поддрессоренной массы z_n ; в, г — ускорений поддрессоренной массы \ddot{z}_n ; д, е — показателя сцепления колеса с дорожным полотном $(z_n - q)$

стохастического сигнала, имитирующего движение автомобиля по реальной дороге, со скоростью 5 и 40 м/с, показаны на рис. 5.

Кинематическое воздействие смоделировано по методике, предложенной в работе [14] для дороги класса Е по стандарту [15]. Скорости

движения автомобиля для случайного сигнала выбраны равными 5 и 40 м/с. На графиках для сравнения на скользящем окне длиной 3 с приведены среднеквадратичные отклонения перемещений и ускорений поддресоренной массы, а также сцепления колеса с дорожным полотном. Штрихпунктирной линией показано значение показателя сцепления, соответствующее отрыву колеса от дорожного полотна.

Из графиков видно, что независимо от скорости движения автомобиля адаптивный закон управления подвеской по сравнению с неуправляемым вариантом ощутимо снижает линейные перемещения поддресоренной массы. При этом ускорения поддресоренной массы и свойства сцепления колеса с дорожным полотном практически такие же, как у неуправляемой подвески.

Из дополнительных исследований рассмотренного адаптивного алгоритма также установлено, что эффективность управления (в смысле исходных целевых установок) повышается, если диапазон регулирования коэффициента демпфирования подвески вместо 2,5 довести до 50 раз. Это возможно по данным работы [12]. Также повышению эффективности способствует использование управления магнитореологическим демпфером от «средней точки», когда исходное неуправляемое состояние подвески задает ненулевой управляющий сигнал. Регулирование демпфера предполагает как увеличение

коэффициента демпфирования, так и его снижение относительно указанного исходного состояния.

Выводы

1. Результаты исследований показали способность предлагаемого адаптивного закона управления подвеской функционировать в условиях текущей априорной неопределенности. Установлено, что адаптивный закон управления улучшает свойства подвески в диапазоне частот 4...13 рад/с, наиболее важном с точки зрения обеспечения комфорта водителю и пассажирам. Предлагаемый закон управления способен парировать как силовые возмущения, действующие на подвеску, так и кинематические. Алгоритм позволяет уменьшить воздействие силовых возмущений до 63 %, а также повысить уровень комфорта водителя и пассажиров путем снижения линейных перемещений корпуса автомобиля до 25...35 %. Подобные результаты получены и при других условиях.

2. Рассмотренный алгоритм адаптивного управления позволяет улучшить свою эффективность при увеличении диапазона регулируемых свойств магнитореологического демпфера, а также при использовании управления как в сторону увеличения коэффициента демпфирования, так и в сторону его снижения.

Литература

- [1] Белоусов Б.Н., Меркулов И.В., Федотов И.В. Управляемые подвески автомобилей. *Автомобильная промышленность*, 2004, № 1, с. 23–24.
- [2] Круглов С.П. Сходимость невязки идентификации в системе управления с параметрической адаптацией. *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами*, 2019, № 1, с. 27–40. URL: https://ismm.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/kruglov_shodneyvazkiidentif_0.pdf
- [3] Круглов С.П., Заковырин И.А. Управление адаптивной подвеской автомобиля на основе идентификационного алгоритма. *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами*, 2020, № 3(8), с. 29–44. URL: https://ismm.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/kruglov_zakovyirin.pdf
- [4] Чернышов К.В. *Улучшение виброзащитных свойств и стабильности характеристик пневмогидравлических рессор*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, Волгоградский ГТУ, 1999. 22 с.
- [5] Чернышов К.В., Поздеев А.В., Рябов И.М. Виброзащитные свойства подвески автомобиля при оптимальном мгновенном регулировании демпфирования в цикле колебаний. *Пром-Инжиниринг. Тр. V Всерос. науч.-тех. конф.* Челябинск, ЮУрГУ, 2019, с. 57–62.
- [6] Zhou Q., Nielsena S., Qu W. Semi-active control of three-dimensional vibrations of an inclined sag cable with magnetorheological dampers. *J. Sound Vib.*, 2006, vol. 296, no. 1–2, pp. 1–22, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.10.028>

- [7] Льюнг Л. *Идентификация систем. Теория для пользователя*. Москва, Наука, 1991. 431 с.
- [8] Круглов С.П. Модификации рекуррентного метода наименьших квадратов с фактором забывания для функциональной устойчивости текущего параметрического оценивания динамических процессов. *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами*, 2019, № 1, с. 1–12. URL: <https://ismm.irgups.ru/en/node/139>
- [9] Бесекерский В.А., Попов Е.П. *Теория систем автоматического управления*. Санкт-Петербург, Профессия, 2003. 747 с.
- [10] Peng G.R., Li W.H., Du H., et al. Modelling and identifying the parameters of a magnetorheological damper with a force-lag phenomenon. *Appl. Math. Model.*, 2014, vol. 38, no. 15-16, pp. 3763–3773, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.12.006>
- [11] ГОСТ 33101–2014. *Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности*. Москва, Стандартинформ, 2016. 23 с.
- [12] Плехов А.С., ред. *Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение*. Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. 93 с.
- [13] Жданов А.А., Липкевич Д.Б. AdCAS система автономного адаптивного управления активной подвеской автомобиля. *Труды ИСП РАН*, 2004, т. 7, с. 119–159.
- [14] Zhou Q. *Research and simulation on new active suspension control system*. Lehigh University, 2013. 93 p.
- [15] ИСО 8608:2016. *Вибрация механическая. Профили дорожного покрытия. Представление результатов измерений*. Москва, Стандартинформ, 2016. 44 с.

References

- [1] Belousov B.N., Merkulov I.V., Fedotov I.V. Controlled vehicle suspension. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2004, no. 1, pp. 23–24 (in Russ.).
- [2] Kruglov S.P. Convergence of the residual identification error in the control system with parametrical adaptation. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami* [Information Technology and Mathematical Modeling in the Management of Complex Systems], 2019, no. 1, pp. 27–40. URL: https://ismm.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/kruglov_shodnevzakiidentif_0.pdf (in Russ.).
- [3] Kruglov S.P., Zakovyrin I.A. Development of adaptive suspension control with a magnetic-rheological liquid based on an identification algorithm. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami* [Information Technology and Mathematical Modeling in the Management of Complex Systems], 2020, no. 3(8), pp. 29–44. URL: https://ismm.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/kruglov_zakovyrin.pdf (in Russ.).
- [4] Chernyshov K.V. *Uluchshenie vibrozashchitnykh svoystv i stabil'nosti kharakteristik pnevmogidravlicheskiykh resor*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improving vibration protection properties and stability of pneumatic spring characteristics. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Volgograd, Volgogradskiy GTU Publ., 1999. 22 p.
- [5] Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Ryabov I.M. [Vibration isolation properties of vehicle suspension at optimal instantaneous damping control in oscillation cycle]. *Prom-Inzhiniring. Tr. V Vseros. nauch.-tekh. konf.* [Prom-engineering. Proc. V Russ. Sci.-Tech. Conf.]. Chelyabinsk, YuUrGU Pub., 2019, pp. 57–62.
- [6] Zhou Q., Nielsen S., Qu W. Semi-active control of three-dimensional vibrations of an inclined sag cable with magnetorheological dampers. *J. Sound Vib.*, 2006, vol. 296, no. 1-2, pp. 1–22, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.10.028>
- [7] Ljung L. *System identification. Theory for the user*. Pearson, 1998. 627 p. (Russ. ed.: *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya*. Moscow, Nauka Publ., 1991. 431 p.)
- [8] Kruglov S.P. Modifications of the recurrent method of least squares with forgetting factor for the functional stability of the current parametrical estimation of dynamic processes. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami* [Information Technology and Mathematical Modeling in the Management of Complex Systems], 2019, no. 1, pp. 1–12. URL: <https://ismm.irgups.ru/en/node/139> (in Russ.).

- [9] Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. Sankt-Petersburg, Professiya Publ., 2003. 747 p.
- [10] Peng G.R., Li W.H., Du H., et al. Modelling and identifying the parameters of a magnetorheological damper with a force-lag phenomenon. *Appl. Math. Model.*, 2014, vol. 38, no. 15-16, pp. 3763–3773, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.12.006>
- [11] GOST 33101–2014. *Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Pokrytiya dorozhnye. Metody izmereniya rovnosti* [State standard 33101–2014. Automobile roads of general use. Road pavement. Roughness measurement methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 23 p.
- [12] Plekhov A.S., ed. *Magnitoreologicheskie zhidkosti: tekhnologii sozdaniya i primeneniye* [Magnetorheologic liquids: production technology and application]. Nizhniy Novgorod, NGTU im. R.E. Alekseeva Publ., 2017. 93 p.
- [13] Zhdanov A.A., Lipkevich D.B. AdCAS system of adaptive built-in control on vehicle suspension. *Trudy ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2004, vol. 7, pp. 119–159 (in Russ.).
- [14] Zhou Q. *Research and simulation on new active suspension control system*. Lehigh University, 2013. 93 p.
- [15] ISO 8608:2016. *Mechanical vibration. Road surface profile. Reporting of measured data*. BSI, 2016. 36 p. (Russ. ed.: ISO 8608:2016. Vibratsiya mekhanicheskaya. Profili dorozhnogo pokrytiya. Predstavlenie rezul'tatov izmereniy. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 44 p.)

Статья поступила в редакцию 30.01.2021

Информация об авторах

КРУГЛОВ Сергей Петрович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов». ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Чернышевского, д. 15, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru).

ЗАКОВЫРИН Игорь Александрович — инженер АСУТП. ООО «ИТЦ Альтер Энерго» (664039, Иркутск, Российская Федерация, ул. Клара Цеткин, д. 9B, e-mail: ZakIgor@bk.ru).

Information about the authors

KRUGLOV Sergey Petrovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Automation of Production Processes. Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Chernyshevsky St., Bldg. 15, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru).

ZAKOVYRIN Igor Alexandrovich — Engineer of the Automated Control System. Engineering and Technical Center Alter Energo Ltd. (664039, Irkutsk, Russian Federation, Klary Tsetkin St., Bldg. 9B, e-mail: ZakIgor@bk.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Круглов С.П., Заковырин И.А. Адаптивное управление амортизатором с магнитореологической жидкостью в подвеске автомобиля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 6, с. 3–12, doi: [10.18698/0536-1044-2021-6-3-12](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-6-3-12)

Please cite this article in English as:

Kruglov S.P., Zakovyryn I.A. Adaptive Control of the Shock Absorber with Magnetorheological Fluid in the Car Suspension. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 3–12, doi: [10.18698/0536-1044-2021-6-3-12](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-6-3-12)