

С. П. Круглов¹, И. А. Заковырин¹

¹ *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

УПРАВЛЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ПОДВЕСКОЙ АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО АЛГОРИТМА

Аннотация. На основе анализа ряда работ, посвященных подвескам автомобилей, приводится краткая их классификация, в частности, – классификация систем управления подвеской автомобилей и других транспортных средств. Приводятся их достоинства и недостатки. В качестве основных недостатков существующих и рассматриваемых в литературе систем является их неспособность функционировать в условиях текущей неопределенности параметров подвески, автомобиля и внешних возмущений, а также невозможность оперативного парирования возмущений. Формируется новый алгоритм управления адаптивной подвеской, способный функционировать в условиях текущей неопределенности указанных параметров. Он строится на основе текущей перестройки системы управления на основе параметрической идентификации математической модели объекта управления, проводимой в текущем времени функционирования системы управления, и неявной эталонной модели. В качестве управляемого элемента используется регулируемая степень демпфирования амортизатора подвески с помощью магнито-реологической жидкости. На примере одномассовой модели подвески «четверть автомобиля» проведено модельное исследование эффективности полученного алгоритма, а также его сравнение с наиболее близким по поставленной задаче – методом мгновенного переключения степени демпфирования подвески.

Ключевые слова: управляемая подвеска, полуактивная система управления подвеской, магнито-реологическая жидкость, алгоритмы управления, адаптивная система управления.

S. P. Kruglov¹, I. A. Zakovyryn¹

¹ *Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation*

DEVELOPMENT OF ADAPTIVE SUSPENSION CONTROL WITH A MAGNETIC-RHEOLOGICAL LIQUID BASED ON AN IDENTIFICATION ALGORITHM

Abstract. Based on the analysis of a number of works devoted to car suspensions, a brief classification is given, in particular, the classification of suspension control systems for cars and other vehicles. Their advantages and disadvantages are given. The main disadvantages of the existing systems and those considered in the literature are their inability to function under the current uncertainty of the parameters of the suspension, vehicle and external disturbances, as well as the impossibility of promptly countering disturbances. A new adaptive suspension control algorithm is being formed, capable of functioning under the conditions of the current uncertainty of the specified parameters. It is built on the basis of the current restructuring of the control system on the basis of the parametric identification of the mathematical model of the control object, carried out at the current time of the control system functioning, and an implicit reference model. As a controlled element, an adjustable degree of damping of the suspension shock absorber using a magnetorheological fluid is used. On the example of a single-mass suspension model "a quarter of a car", a model study of the efficiency of the obtained algorithm was carried out, as well as its comparison with the one that is closest in terms of the task at hand - the method of instantaneous switching of the degree of suspension damping.

Keywords: controlled suspension, semi-active suspension control system, magneto-rheological fluid, control algorithms, adaptive control system.

Введение. Конструкция и параметры подвески автомобиля определяют важнейшие его качества, такие как: комфорт, безопасность, управляемость, устойчивость. С одной стороны, подвеске необходимо быть комфортной, кузов должен быть изолирован от колебаний, вызванных дорожным покрытием. Это достигается установкой мягкой пружины и слабой степенью демпфирования. С другой стороны, транспортное средство должно обеспечить хорошую управляемость, чтобы увеличить безопасность езды, особенно на высокой скорости. Для этого нужна жесткая, хорошо демпфированная связь между транспортным средством и дорогой. Следовательно, требования, связанные с комфортом и безопасностью, противоречат друг другу. Принято рассматривать внешние возмущения, действующие на

автомобиль (транспортное средство), двух видов: *силовое* и *кинематическое*. Первое связано с инерционными свойствами корпуса автомобиля при маневрировании – это действие на корпус ускорений при разгоне-торможении, при разворотах, смене полосы движения и пр. То есть это возмущение на подвеску со стороны корпуса автомобиля. Кинематическое возмущение – это возмущение из-за неровности дороги (подстилающей поверхности), или возмущение на подвеску со стороны колеса. Задачей подвески является парирование нежелательных проявлений обеих этих возмущений.

До недавнего времени в автомобилестроении использовались только *пассивные*, или *неуправляемые подвески*. Их отличает фиксированность параметров, независимо от режимов и условий эксплуатации автомобиля. Обычно, характеристики таких подвесок рассчитываются по усредненным показателям, и они, конечно же, не могут обеспечивать качественные показатели для отдельных дорожных условий и режимов движения.

На смену пассивным в настоящее время пришли *управляемые*, или *активные подвески*. Здесь термин «активные» принадлежит ко всей подвеске и понимается в смысле ее способности перестраиваться по изменяющимся условиям (по командам водителя, или автоматически), а также появления систем управления подвеской (СУП). Часто их также называют *адаптивными подвесками* (имея в виду тот же смысл возможности перестройки). Установлено, что для современного автомобиля, нацеленного на обеспечение максимального комфорта водителю и пассажирам, высокого уровня безопасности, широкого диапазона режимов использования, высокой функциональности (для специальных автомобилей и других транспортных средств), нет альтернативы управляемым подвескам [1].

Управляемые подвески по динамике управления подразделяются на подвески со *статическим* и *динамическим управлением* (*статические* и *динамические СУП*). Первые уже получили широкое распространение в современном автомобилестроении. Они направлены на изменение параметров подвески по осредненной ситуации движения. То есть предполагают дискретную настройку параметров подвески к режиму движения или использования автомобиля: его скорости, уровня загрузки, качества опорной (дорожной) поверхности и т.д. Если условия не меняются, подвеска работает как неуправляемая. Статическое управление направлено на обеспечение соответствия параметров элементов подвески каждому из текущих стационарных режимов ее работы.

Примером подвесок со статическим управлением являются пневматические подвески с изменением клиренса (дорожного просвета) по командам водителя, подвески с режимами работы: «Основной», «Комфорт», «Спорт», – соответствующим изменению жесткости подвески на режимах обычной езды, езды по бездорожью и скоростной езды по шоссе (также по командам водителя). Такими подвесками оснащены автомобили, например, фирм «Митсубиси», «Ситроен», «Тойота», «Порше» [1, 2]. Другим примером статического управления подвеской являются СУП, изменяющие дискретно коэффициент жесткости подвески автоматически по показаниям датчиков, например, на режимах движения: «Разгон-торможение», «Поворот, смена полосы». Здесь изменяется жесткость только части стоек подвески автомобиля, чтобы из-за ускорений избежать наклона корпуса [2].

Динамические СУП реагируют на текущие показания датчиков, формируя переменное по времени дополнительное силовое воздействие в подвеске, например, с целью снижения линейных перемещений и/или ускорений поддрессоренной массы (корпуса автомобиля) при движении по неровной поверхности. Такие системы находятся в настоящее время, в основном, на стадии научных проработок и опытных образцов [1].

В свою очередь динамические СУП подразделяются на системы с *непрерывным* и *дискретным (релейным) управлением* (*непрерывные* и *дискретные (релейные) динамические СУП*). Из названия следует, что первые формируют управление непрерывно во времени, вторые – дискретно, или релейно. Примером последних систем являются разработки, представленные, например, в работах [2,3]. Преимуществом непрерывного управления является оперативное реагирование на возмущение, а следовательно, более точное выполнение поставленной цели. Однако такие системы чувствительны к задержкам в канале

управления (не более 0.1 с) и помехам измерений необходимой информации (не более 2.5-5% от точного значения). Дискретные системы могут обеспечивать сравнимое качество управления и не имеют указанных недостатков [4].

По принципу управления динамические СУП подразделяются на *активные системы* (здесь термин «активные» относится к СУП) – предполагающие для решения своих задач подвод энергии со стороны (как правило гидравлические системы); *полуактивные* – за счет изменения параметров подвески, например, жесткости, коэффициента демпфирования; *комбинированные* – являющиеся сочетанием первых двух. Иногда указанные термины применяют непосредственно к подвескам, имея в виду их системы управления.

Активные СУП строятся, как правило, на основе гидравлической системы с использованием гидронасосов. Полуактивные СУП используют регулирование жесткости подвески переключением ёмкостей пневматической подвески, регулирование относительного коэффициента затухания подвески с помощью регулируемых дросселей, напорных, обратных и запорных клапанов (гидравлическая система), а также электрическим управлением амортизаторов с магнитоореологической жидкостью [1, 2, 5]. Преимуществом последнего является высокое быстродействие – переключение за 1 миллисекунду [6]. Подвески с полуактивной непрерывной системой управления степенью демпфирования подвески имеют устоявшееся название *адаптивной подвески* [7].

Достоинством активных СУП является высокое качество управления, недостатком – большой расход энергии и сложность системы управления. Достоинство полуактивных СУП – ничтожно малый расход энергии и эффективность управления, сравнимая с активными системами. Многие исследователи указывают на перспективность разработки именно полуактивных СУП (полуактивных подвесок).

Поскольку СУП являются системами автоматического управления, то в качестве дальнейшей классификации этих систем можно применить известную градацию систем автоматического управления [8]. В этом направлении можно выделить наиболее значимые подходы к синтезу СУП, используемые исследователями в рассматриваемой области.

Например, – это полуактивная СУП с регулированием относительного коэффициента затухания на основе анализа передаточной функции подвески и ее частотной характеристики [8-11]; активная непрерывная и полуактивная релейная СУП с построением оптимального управления [12, 13]; активная СУП с программной адаптацией [14]; активные СУП с использованием ПД- и ПИД-регулятора [15-17]. Недостатком этих систем является необходимость априорной информации характеристик подвески и автомобиля, которые, как известно, постоянно меняются. Например, в работе [18], указывается на существенные изменения характеристик подвески по мере ее разогрева во время эксплуатации. Известно мнение, что построить модель автомобиля для текущего момента времени практически невозможно [19]. Еще к недостаткам указанных работ можно отнести невозможность учесть неконтролируемые возмущения; необходимость предварительного построения программы изменения параметров подвески и др.

Достаточно перспективными являются подходы с использованием нечеткой логики [3, 20], нейроконтроллерного принципа управления [19, 21], построения экстремальной системы управления [22]. Однако недостатком этих систем является невозможность их использования для реализации быстродействующей СУП для парирования внешних возмущений в условиях текущей неопределенности параметров автомобиля, подвески и возмущений. Например, в последней из указанных работ время настройки составляет около 100 с.

Примером возможности построения СУП без использования текущей информации о параметрах автомобиля и подвески в задаче парирования кинематических возмущений является использование достаточно эффективного метода мгновенного переключения степени демпфирования подвески, на основе принципа максимума Л.С.Понтрягина [23]. Однако такой метод сопряжен с дополнительными шумами и ударами в подвеске, что снижает ее эксплуатационные свойства. Авторы указывают на необходимость поиска непрерывных законов управления.

Задачей данной работы является попытка устранения указанных недостатков путем формирования непрерывной полуактивной СУП с магнитореологической жидкостью, построенной на адаптивном с текущей неопределенностью законе управления (адаптивная подвеска с адаптивным законом управления). Последний построен на текущей идентификации параметров подвески (куда входят и параметры автомобиля) и возмущений, который способен функционировать в условиях указанной текущей априорной неопределенности. Для сравнения эффективности предлагаемого подхода, он будет сравнен с методом мгновенного переключения степени демпфирования по [23]. Данная работа является логическим продолжением работы [24].

Исходные постановки. Для исследования свойств подвески в поставленной задаче можно использовать широко известную одномассовую одноопорную математическую модель подвески, приведенную к одному колесу автомобиля с присоединенной массой в «четверть автомобиля», например [25]. Эта модель схематично представлена на рис.1. На рисунке обозначено: m – масса автомобиля, присоединенная к одному колесу (поддрессоренная масса); z – линейные перемещения поддрессоренной массы; c – коэффициент жесткости пружины амортизатора; k – коэффициент демпфирования амортизатора; q – кинематическое возмущение на подвеску.

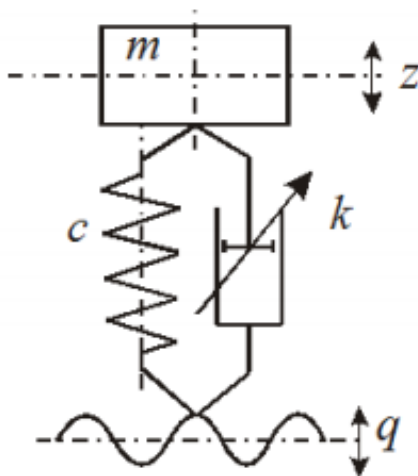


Рис. 1. Схема одномассовой одноопорной подвески «четверть автомобиля»

Модель описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\ddot{z} = \frac{k_0 + \Delta k}{m}(\dot{q} - \dot{z}) + \frac{c}{m}(q - z); \quad \dot{z}(t_0) = \dot{z}_0; \quad z(t_0) = z_0, \quad (1)$$

где: $k \triangleq k_0 + \Delta k$; k_0 – постоянное значение коэффициента демпфирования; $\Delta k \geq 0$ – регулируемое значение коэффициента демпфирования; t – текущее время, а t_0 – его начальный момент. Считаем, что параметры модели m, c, k_0 – являются неизвестными и в общем случае меняющимися по времени, а переменные $\ddot{z}, (\dot{z} - \dot{q}), (q - z)$ – непосредственно измеряемыми.

Метод мгновенного переключения степени демпфирования подвески, нацеленный на снижение перемещений поддрессоренной массы, описывается зависимостями [23, 25]:

$$k = \begin{cases} k_{\max}, & \text{при } (\dot{z} - \dot{q})\dot{z} \geq 0; \\ k_{\min} = k_0, & \text{при } (\dot{z} - \dot{q})\dot{z} < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $k_{\max}, k_{\min}$ – максимальное и минимальное значение коэффициента демпфирования в соответствии с (1).

Синтез адаптивного закона управления. Представим первую часть выражений (1) в виде:

$$\ddot{z} = \frac{c}{m}(q - z) + \frac{k_0}{m}(\dot{q} - \dot{z}) + \frac{1}{m}\Delta k(\dot{q} - \dot{z}) = \theta^T y, \quad (3)$$

где: $\theta^T \triangleq [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$ – вектор неизвестных параметров математической модели;

$y^T \triangleq [y_1, y_2, y_3]$ – вектор переменных; $\theta_1 = c/m$; $\theta_2 = k_0/m$; $\theta_3 = 1/m$; $y_1 = (q - z)$;

$y_2 = (\dot{q} - \dot{z})$; $y_3 = \Delta k(\dot{q} - \dot{z})$.

Для поиска неизвестных параметров в текущем времени предлагается использовать рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [26]

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + P_i y_i \varepsilon_i; & \varepsilon_i = \ddot{z}_i - \hat{\theta}_{i-1}^T y_i; \\ P_i = \tilde{P}_{i-1} - \tilde{P}_{i-1} y_i y_i^T \tilde{P}_{i-1} (1 + y_i^T \tilde{P}_{i-1} y_i)^{-1}; \\ \tilde{P}_{i-1} = P_{i-1} / \beta_{\text{заб}}; & P_0 = E_3 \gamma; \quad \gamma \rightarrow +\infty. \end{cases} \quad (4)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ – дискретные моменты времени; $\hat{\theta}_i$ – вектор искомых оценок (символ « $\wedge$ » сверху элемента означает его оценку); ε_i – невязка идентификации; $\beta_{\text{заб}}$ – параметр забывания прошлых измерений, удовлетворяющий соотношениям: $0 < \beta_{\text{заб}} < 1, \beta_{\text{заб}} \rightarrow 1$; E_3 – единичная 3×3 матрица; γ – большое положительное число.

Для повышения устойчивости работы алгоритма в условиях реальных факторов (линейная зависимость переменных, необеспеченность «богатства» входного сигнала, влияние шумов измерений) рекомендуется также использовать модификации указанного алгоритма, описанные в работе [27].

Для формирования заданных свойств замкнутой системе управления используем неявную эталонную модель (эталон), которая по физике движений подвески соответствует колебательному звену [8]:

$$\ddot{z}_m = a_{m1} \dot{z}_m + a_{m0} z_m; \quad \dot{z}_m(t_0) = \dot{z}_0; \quad z_m(t_0) = z_0, \quad (5)$$

где z_m – выход эталонной модели; $a_{m1} = -2\omega_m \xi_m$; $a_{m0} = -\omega_m^2$; ω_m – собственная частота модели; ξ_m – относительный коэффициент затухания модели; начальные условия совпадают с объектом управления в силу неявности эталонной модели.

Если считать параметры (3) известными, приравнивая правые части первых равенств (3) и (5), заменив в последнем z_m на z и $\dot{z}_m$ на $\dot{z}$, можно найти управляющее воздействие на подвеску (назовем его точным, Δk^*) в виде равенства

$$\Delta k^* = \frac{a_{m1} \dot{z} + a_{m0} z - \theta_1 (q - z)}{\theta_3 (\dot{q} - \dot{z})} - \frac{\theta_2}{\theta_3}, \quad (6)$$

при условии, что $\theta_3 (\dot{q} - \dot{z}) \neq 0$.

Действительно, если подставить его в (3), то получим динамику замкнутой системы управления, соответствующей назначенной эталонной модели (5).

Поскольку параметры объекта управления все-таки неизвестны, реальный закон управления вместо (6) будет построен на текущих оценках параметров, доставляемых алгоритмом идентификации (4). Учитывая также указанные выше ограничения, этот закон выразится в виде:

$$\Delta k = \text{sat}_{0, \Delta k_{\max}} \left[\left(\frac{a_{M1} \dot{z} + a_{M0} z - \hat{\theta}_1 (q - z)}{\text{sat}_{|\dot{q} - \dot{z}|_{\min}} (\dot{q} - \dot{z})} - \hat{\theta}_2 \right) / \text{sat}_{|\hat{\theta}_3|_{\min}} \hat{\theta}_3 \right], \quad (7)$$

где $\text{sat}_{0, \Delta k_{\max}} [\cdot]$ – функция ограничения аргумента диапазоном от 0 до $\Delta k_{\max}$; $\text{sat}_{|\cdot|_{\min}} (\cdot)$ – функция ограничения аргумента минимальным значением его модуля.

Как следует из выводов работы [27], при условии, что переменные находятся внутри указанных ограничений: свойства замкнутой системы управления с темпом сходимости к нулю невязки идентификации (ее скорость сходимости гораздо выше скорости сходимости оценок к точным значениям) будут приближаться к свойствам назначенного эталона, если выполнены условия:

$$\text{sign}(\hat{\theta}_3) = \text{sign}(\theta_3); \quad 0.5|\theta_3| < |\hat{\theta}_3| < 2|\theta_3|; \quad d\hat{\theta}_3/dt \rightarrow 0. \quad (8)$$

Ниже в результатах исследования показано, быстрое выполнение этих условий, что обусловлено широко известной высокой эффективностью процедуры наименьших квадратов.

Модельный пример. Исследования проводились в среде Matlab/Simulink (см. рис.2).

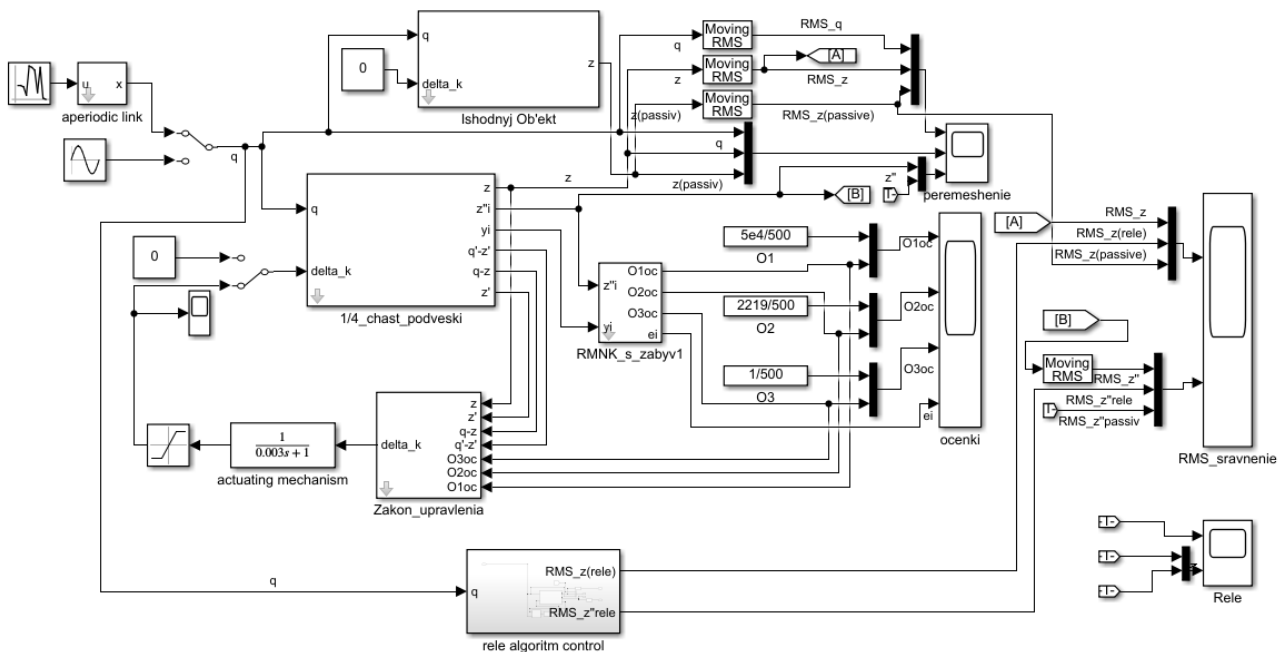


Рис. 2. Модель подвески в Matlab Simulink

Параметры модели подвески по (1) были выбраны для типовой конфигурации автомобиля и регулируемой подвески с магнитоореологической жидкостью: $c = 50000 \text{ Н/м}$; $k_0 = 2219 \text{ Нс/м}$; $m = 500 \text{ кг}$; $\Delta k = 0 \dots 2 \cdot 10^4 \text{ Нс/м}$.

Для реализации предлагаемого адаптивного алгоритма управления принято следующее. Параметры алгоритма идентификации (4): $\beta_{\text{заб}} = 0.98$; $\gamma = 100$. Временной шаг дискретности алгоритма идентификации 0.001 с , с этим же шагом вычислялся в дискретной форме закон управления (6). Параметры эталонной модели (5): $\omega_m = 15 \text{ рад/с}$; $\xi_m = 0.99$, что соответствует хорошей затухаемости колебаний. Параметры закона управления (7): $\text{sat}|\dot{q}-\dot{z}|_{\min} = 0.1$; $\text{sat}|\hat{\theta}_3|_{\min} = 10^{-5}$. Задержка управляющего сигнала в системе управления моделировалась апериодическим звеном с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени 0.01 с .

Для реализации алгоритма управления по методу мгновенного переключения (2) принят тот же дискретный временной шаг, диапазон изменения Δk , а задержка в системе управления принята величиной значение 0.001 с с помощью блока чистого запаздывания (более, чем в 10 раз меньше, чем принятая задержка для предлагаемого алгоритма). Это объясняется следующим. По результатам исследования определена сильная зависимость качества демпфирования по алгоритму (2) от временной задержки в системе управления. Например, задержка величиной более 0.001 с приводила к тому, что при высоких частотах возмущения подвеска с управлением по методу мгновенного переключения давала худшие результаты, чем неуправляемая подвеска.

Сигнал кинематического возмущения, $q(t)$ представлял собой гармоническое возмущение с амплитудой 0.1 м и частотой $6, 30$ и 60 рад/с (что соответствует разным скоростям движения), а также случайный стохастический сигнал с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением, представленным на графиках. Изменение скорости для последнего сигнала моделировалось пропусканием случайного центрированного гауссовского сигнала через апериодическое звено с единичным коэффициентом усиления и с разными постоянными времени (чем меньше ее значение, тем выше скорость).

Исследования проводились в виде сравнения качества демпфирования указанных возмущений подвеской при условии работы в неуправляемом режиме с параметром $k = k_0 + \Delta k = 10^4 \text{ Нс/м} = \text{const}$, по алгоритму (2) и предлагаемому адаптивному управлению по (4), (5) и (7). Анализировалось снижение линейных перемещений подрессоренной массы и ее ускорений.

В качестве примера функционирования алгоритма идентификации на рис.3 представлен процесс оценивания неизвестных параметров алгоритмом (4) при синусоидальном возмущении. Алгоритм идентификации получил оценки параметров объекта управления с погрешностью в 1% , примерно, за 0.2 секунды. На графике, оценки изображены черными линиями; пунктирными – истинные значения параметров; синим – невязка идентификации.

В представленном демонстрационном исследовании алгоритма идентификации начальные значения оценок – нулевые. В дальнейших исследованиях начальное значение оценки $\hat{\theta}_3$ принималось величиной 0.1 (в 50 раз больше истинного значения). При этом характер поведения оценок оставался приблизительно таким же.

Результаты исследования системы управления подвеской с гармоническим входным возмущением представлены на рисунках 4, 5, 6. Результаты моделирования с случайным входным сигналом – на рисунках 7, 8, 9. В качестве сравнения были приведены среднеквадратичные отклонения (СКО) на скользящем окне (длиной около 3 с) линейных перемещений подрессоренной массы и её ускорений. Желтым цветом изображен неуправляемый режим, зеленым – релейный алгоритм, черным – предлагаемый адаптивный алгоритм.

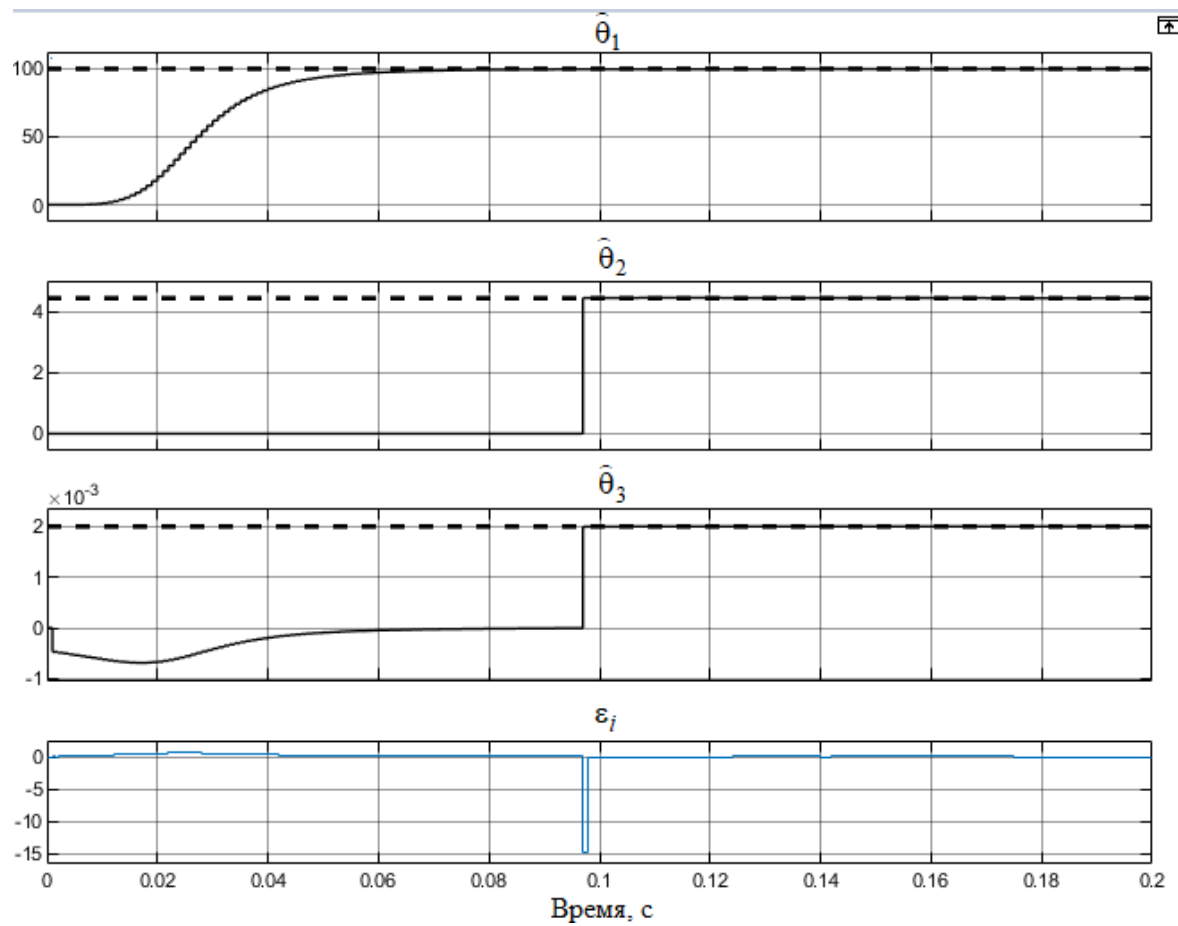


Рис. 3. Оценки параметров при гармоническом возмущении

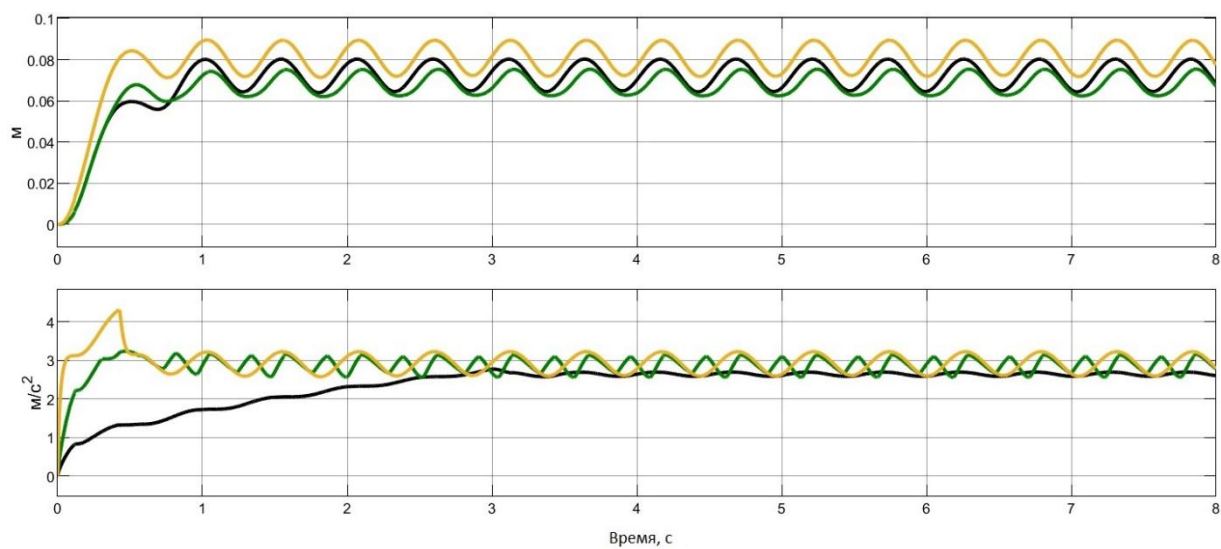


Рис. 4. Частота $q(t)$ 6 рад/с, амплитуда 0.1 м

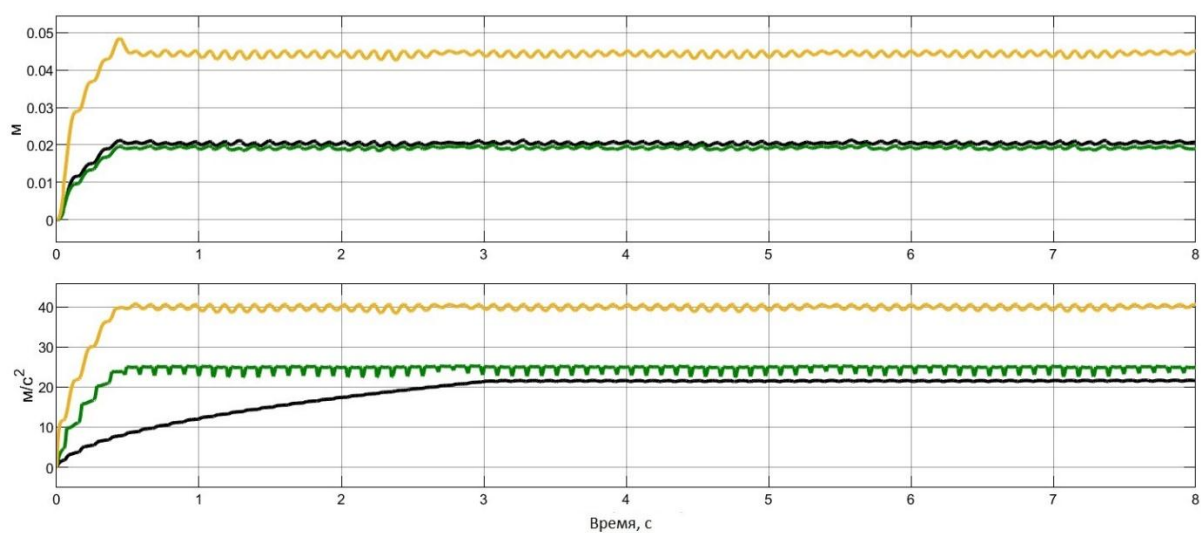


Рис. 5. Частота $q(t)$ 30 рад/с, амплитуда 0.1 м

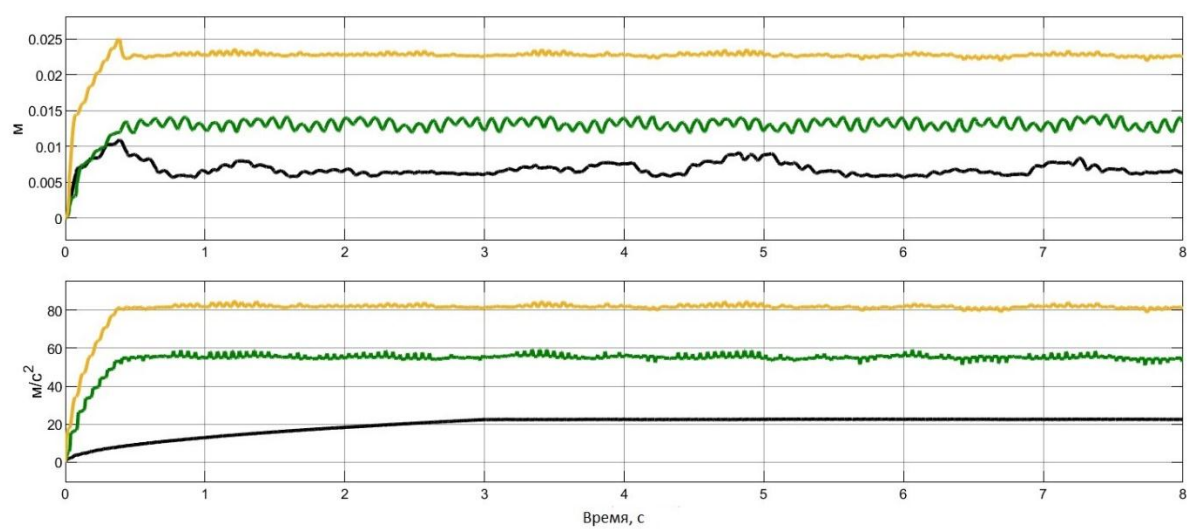


Рис. 6. Частота $q(t)$ 60 рад/с, амплитуда 0.1 м

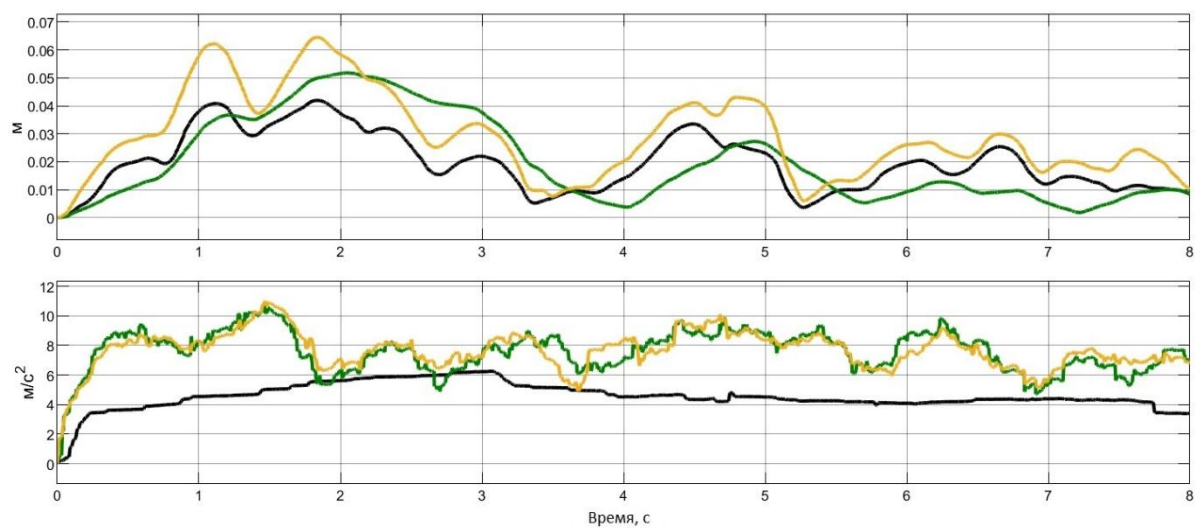


Рис. 7. Постоянная времени фильтра 0.9 с

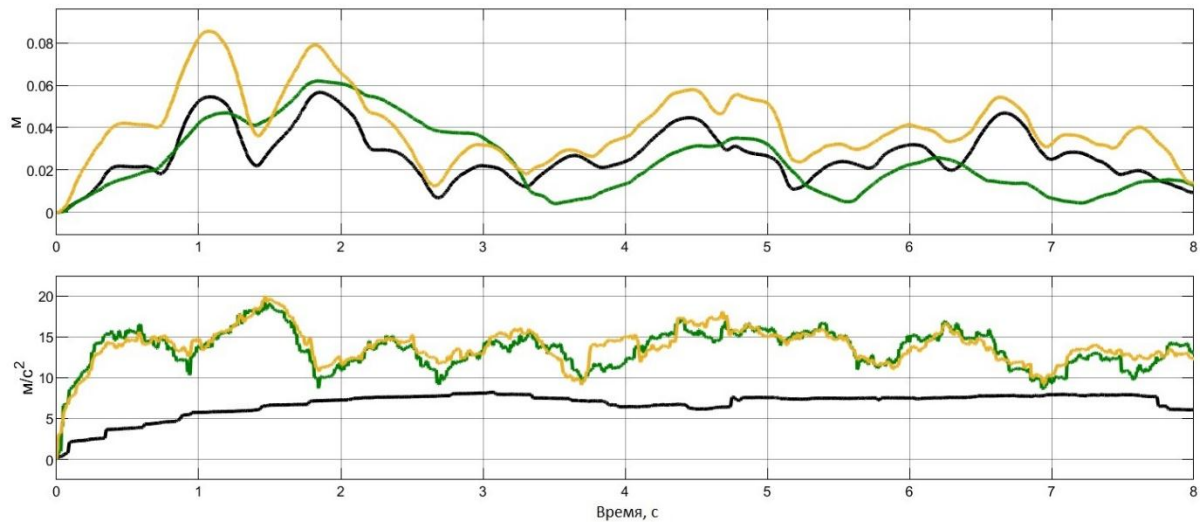


Рис. 8. Постоянная времени фильтра 0.5 с

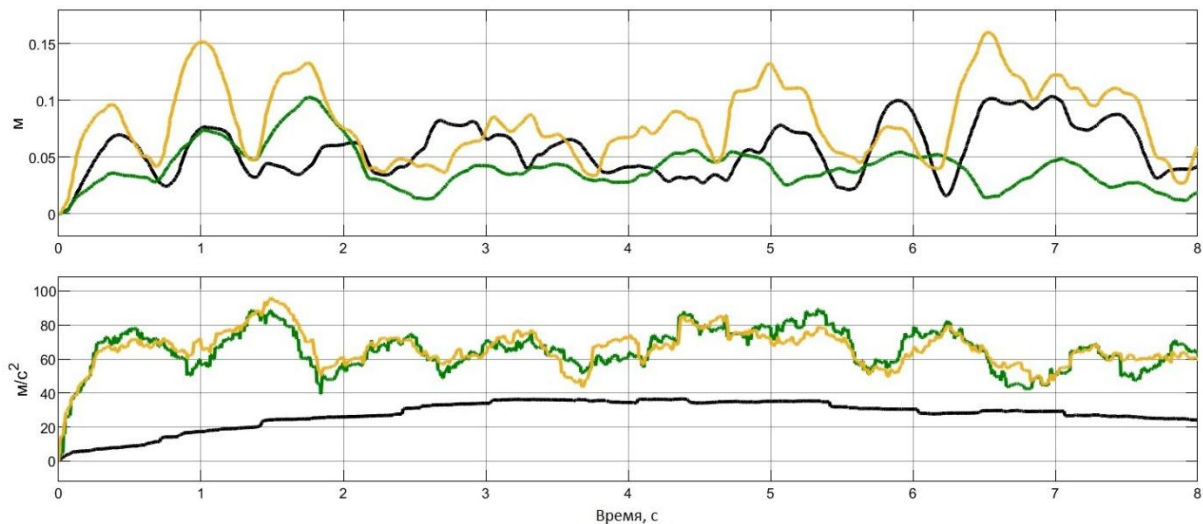


Рис. 9. Постоянная времени фильтра 0.1 с

На всех представленных графиках, видно, что оба алгоритма снижают амплитуду колебаний. В зависимости от скорости автомобиля, амплитуда линейных перемещений поддресоренной массы может быть уменьшена до 50%. По амплитуде колебаний поддресоренной массы предлагаемый алгоритм адаптивного управления ведет практически так же (с задержкой в 10 раз больше), как и по методу мгновенного переключения, а по снижению виброускорений – намного лучше последнего, особенно на высоких скоростях, снижая их до 40%.

Закключение. Исследования показывают способность предлагаемого адаптивного закона управления подвеской функционировать в условиях текущей априорной неопределенности. Его характеризует гораздо большая эффективность в сравнении с методом мгновенного переключения: он не так чувствителен к задержкам в системе управления, намного лучше справляется с демпфированием кинематических возмущений.

Из изложенного также следует, что предлагаемый закон управления способен парировать как кинематические, так и силовые возмущения – при этом в модели (1) появится дополнительный член, который необходимо идентифицировать и учитывать в управлении.

Кроме того, из введенного в (3) параметра θ_3 следует, что для выполнения условий (8)

достаточно лишь очень приближенно знать массу автомобиля (от половины до двух истинных значений) – это достаточно простое для практики условие. В связи с этим, как вариант, оценку $\hat{\theta}_3$ можно назначить постоянной внутри указанного диапазона и исключить из процедуры идентификации. Это намного упрощает реализацию адаптивной системы управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов Б.Н., Меркулов И.В., Федотов И.В. Управляемые подвески автомобилей // Автомобильная промышленность, 2004, № 1. – С. 23-24.
2. Юрлин Д.В., Бахмутов С.В., Кулагин В.А. Базовые алгоритмы управления жёсткостью пневмоэлементов подвески автомобиля // Труды НАМИ. – 2020. – № 1 (280). – С. 20–35.
3. Жилейкин М. М., Мардеева Л. Р., Вержбицкий А. Н. Разработка адаптивного релейного закона управления демпфированием подвески многоосных колесных машин с целью противодействия продольно-угловым колебаниям корпуса // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2013, №8, 2013. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/567732.html>.
4. Жилейкин М. М. Сравнительный анализ эффективности работы непрерывной и релейной систем управления подвеской многоосных колесных машин // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2012, №3. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/347783.html>.
5. Машков И.И. Синтез системы управления подвеской автомобиля, построенной на основе магнитореологического амортизатора. Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики. 2004. 20с.
6. Калинин П.С., Горелов В.А., Жилейкин М.М. Анализ параметрических моделей магнитореологических демпфирующих устройств для колесной транспортной техники // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 2. С. 25-31.
7. Системы современного автомобиля: сайт. – URL: http://systemsauto.ru/pendant/adaptive_chassis.html (дата обращения: 20.04.2020).
8. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления. – С.Петербург: Профессия, 2003. 747 с.
9. Машков И.И. Синтез системы управления подвеской автомобиля, построенной на основе магнитореологического амортизатора. Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики. 2004. 20с.
10. Шелгинских И.Н. Рациональное демпфирование в системе поддрессоривания для обеспечения устойчивости автомобиля при высокоскоростном маневрировании // Труды НАМИ. – 2019. – № 1 (276). – С. 55-63.
11. Кеян А.К., Сопин П.К. Алгоритм управления электромагнитной подвеской // Сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных «Современные технологии: проблемы и перспективы». 2019. С. 161-167.
12. Жилейкин М. М. Синтез адаптивной динамической непрерывной системы гашения колебаний корпуса многоосных колесных машин // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2011, №10. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/347169.html>.
13. Жилейкин М.М., Федотов И.В. Алгоритм комплексного оптимального управления демпфированием в подвеске колесных машин// Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Транспортное и энергетическое машиностроение. 2017, №8. С.46-53.
14. Андреев М.А., Семенов С.Е. Система управления адаптивной пневмогидравлической рессорной колесной машины с изменяемой упругой

характеристикой// Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2013, №11. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/645542.html>.

15. Никифоров П.А., Бураков М.В. Управление активной подвеской автомобиля // Проблемы и перспективы студенческой науки, Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение», 2018, №2(4). – С. 57-59.

16. Кузьмин В.А., Годжаев З.А. Сравнительная оценка эффективности виброзащиты активной системы поддрессирования с ПИД-регулятором // Тракторы и сельхозмашины. №3. 2018. – С. 62-67.

17. Попов А.В. Моделирование и управление системой поддрессирования автомобиля в среде Matlab-Simulink: Магистерская диссертация. – С.Петербург: СПУ Петра Великого, 2018. –53с.

18. Чернышов К.В. Улучшение виброзащитных свойств и стабильности характеристик пневмогидравлических рессор. Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. Волгоградский ГТУ. 1999. 22с.

19. Жданов А.А., Липкевич Д.Б. AdCAS система автономного адаптивного управления активной подвеской автомобиля //Труды института системного программирования РАН. 2004, т.7, С. 119-159.

20. Рынкевич С.А. Адаптивные системы управления АТС // Автомобильная промышленность, 2005, № 6. – С. 36-38.

21. Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Кузьмин В.А. Виброзащита гидравлической системы поддрессирования мобильных машин // В сборнике: Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса России. Сборник материалов Международной научно-практической конференции молодых ученых. 2019. – С. 60-63.

22. Огрызков С.В. Экстремальная система регулирования плавности хода автомобиля // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 134/2012. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2012. – С. 71-74.

23. Чернышов К.В., Поздеев А.В., Рябов И.М. Виброзащитные свойства подвески автомобиля при оптимальном мгновенном регулировании демпфирования в цикле колебаний // Пром-Инжиниринг: труды V всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С.57-62.

24. Заковырин И.А., Круглов С.П. Вопрос о реализации самонастройки в системе управления адаптивной полуактивной подвески транспортного средства [Электронный ресурс] // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. –№2(8) –Режим доступа: – <http://mnv.irkups.ru/toma/28-20>, свободный. –Загл. с экрана. –Яз. рус., англ. (дата обращения: 3.07.2020).

25. Чернышов К. В. Обзор основных алгоритмов регулирования демпфирования в подвеске автомобиля / К. В. Чернышов, М. Ю. Хрипков // Символ науки. – 2016. №4, ч.3. – С. 140-144.

26. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991.

27. 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»: электрон. науч. журн. –2019. –№1. –С. 1-12–Режим доступа: <http://ismm-irkups.ru/toma/12-2019>, свободный. –Загл. с экрана. –Яз. рус., англ. (дата обращения: 22.09.2020).

28. Круглов С.П. Адаптивная автоматизация пилотирования самолетом на больших углах атаки на основе упрощенных условий адаптируемости. Монография. Иркутск: Иркутский филиал Московского государственного университета гражданской авиации, 2012. – 248 с.

REFERENCES

1. Belousov B.N., Merkulov I.V., Fedotov I.V. Upravlyaemye podveski avtomobilej [Controlled car suspensions]. Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry], 2004, № 1. – pp. 23-24.
2. YUrlin D.V., Bahmutov S.V., Kulagin V.A. Bazovye algoritmy upravleniya zhyostkost'yu pnevmoelementov podveski avtomobilya [Basic algorithms for controlling the stiffness of pneumatic elements of a car's suspension] Trudy NAMI. [Proceedings of NAMI] – 2020. – № 1 (280). – pp. 20–35.
3. ZHilejkin M. M., Mardeeva L. R., Verzhbickij A. N. Razrabotka adaptivnogo relejnogo zakona upravleniya dempfirovaniem podveski mnogoosnyh kolesnyh mashin s cel'yu protivodejstviya prodol'no-uglovym kolebaniyam korpusa [Development of an adaptive relay law for controlling the damping of the suspension of multi-axle wheeled vehicles in order to counteract the longitudinal-angular vibrations of the body] Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E.Baumana. Elektron. zhurn. [Science and Education. Moscow State Technical University N.E.Bauman.] 2013, №8, 2013. Access mode: <http://technomag.bmstu.ru/doc/567732.html>.
4. ZHilejkin M. M. Sravnitel'nyj analiz effektivnosti raboty nepreryvnoj i relejnoj sistem upravleniya podveskoj mnogoosnyh kolesnyh mashin [Comparative analysis of the efficiency of continuous and relay control systems for the suspension of multi-axle wheeled vehicles] Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E.Baumana. Elektron. zhurn. [Science and Education. Moscow State Technical University N.E.Bauman.], 2012, №3. Access mode: <http://technomag.edu.ru/doc/347783.html>.
5. Mashkov I.I. Sintez sistemy upravleniya podveskoj avtomobilya, postroennoj na osnove magnitoreologicheskogo amortizatora. [Synthesis of a car suspension control system based on a magnetorheological shock absorber.] Avtoreferat diss. na soisk. uch. st. k.t.n. Moskovskij gosudarstvennyj institut radiotekhniki, elektroniki i avtomatiki. [Abstract dissertation. for a job. uch. Art. Ph.D. Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation.], 2004. 20p.
6. Kalinin P.S., Gorelov V.A., ZHilejkin M.M. Analiz parametricheskikh modelej magnitoreologicheskikh dempfiruyushchih ustrojstv dlya kolesnoj transportnoj tekhniki [Analysis of the parameters of models of magnetorheological damping devices for wheeled transport equipment.] Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. [Izvestiya of higher educational institutions. Mechanical engineering.], 2012. № 2. pp. 25-31.
7. Sistemy sovremennogo avtomobilya: sajt. [Systems of a modern car: website] – URL: http://systemsauto.ru/pendant/adaptive_chassis.html (data obrashcheniya: 20.04.2020).
8. Besekerskij V.A., Popov E.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. [Automatic control theory.] – S.Peterburg: Professiya [S. Petersburg: Profession], 2003. 747 p.
9. Mashkov I.I. Sintez sistemy upravleniya podveskoj avtomobilya, postroennoj na osnove magnitoreologicheskogo amortizatora. [Synthesis of a car suspension control system based on a magnetorheological shock absorber.] Avtoreferat diss. na soisk. uch. st. k.t.n. Moskovskij gosudarstvennyj institut radiotekhniki, elektroniki i avtomatiki. [Abstract dissertation. for a job. uch. Art. Ph.D. Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation.], 2004. 20s.
10. SHelginskih I.N. Racional'noe dempfirovanie v sisteme podressorivaniya dlya obespecheniya ustojchivosti avtomobilya pri vysokoskorostnom manevrirovanii [Rational damping in the suspension system to ensure vehicle stability during high-speed maneuvering] Trudy NAMI. [Proceedings of NAMI] – 2019. – № 1 (276). – pp. 55-63.
11. Keyan A.K., Sopin P.K. Algoritm upravleniya elektromagnitnoj podveskoj [Control algorithm of electromagnetic suspension] Sbornik statej vs Rossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii dlya aspirantov, studentov i molodyh uchyonyh «Sovremennye tekhnologii: problemy i perspektivy». [Collection of articles of the All-Russian-practical conference for graduate students, students and young scientists "Modern technologies: problems and prospects."] 2019. pp. 161-167.

12. ZHilejkin M. M. Sintez adaptivnoj dinamicheskoy nepreryvnoj sistemy gasheniya kolebanij korpusa mnogoosnyh kolesnyh mashin [Synthesis of an adaptive dynamic body of a continuous vibration damping system for multi-axle wheeled machines.] Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E.Baumana. Elektron. zhurn. [Science and Education. Moscow State Technical University N.E.Bauman.] 2011, №10. Access mode: <http://technomag.edu.ru/doc/347169.html>.
13. ZHilejkin M.M., Fedotov I.V. Algoritm kompleksnogo optimal'nogo upravleniya dempfirovaniem v podveske kolesnyh mashin [Algorithm of complex optimal control of damping in the suspension of wheeled vehicles] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie. Transportnoe i energeticheskoe mashinostroenie. [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavod. Mechanical engineering. Transport and power engineering.], 2017, №8. pp.46-53.
14. Andreev M.A., Semenov S.E. Sistema upravleniya adaptivnoj pnevmogidravlicheskoj ressourcej kolesnoj mashiny s izmenyaemoj uprugoj harakteristikoj [Control system of an adaptive pneumohydraulic spring wheeled machine with a variable elastic characteristic] Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E.Baumana. Elektron. zhurn. [Science and Education. Moscow State Technical University N.E.Bauman.], 2013, №11. Access mode: <http://technomag.bmstu.ru/doc/645542.html>.
15. Nikiforov P.A., Burakov M.V. Upravlenie aktivnoj podveskoj avtomobilya [Control of the active suspension of the car] Problemy i perspektivy studencheskoj nauki, Nauchno-issledovatel'skij centr «MashinoStroenie» [Problems and prospects of student science, Research Center "MashinoStroenie"], 2018, №2(4). – pp. 57-59.
16. Kuz'min V.A., Godzhaev Z.A. Sravnitel'naya ocenka effektivnosti vibrozashchity aktivnoj sistemy podressorivaniya s PID-regulyatorom [Evaluation of the effectiveness of vibration protection of a comparative suspension system with a PID controller] Traktory i sel'hozmashiny. №3. [Tractors and agricultural machines. Number 3.], 2018. – pp. 62-67.
17. Popov A.V. Modelirovanie i upravlenie sistemoy podressorivaniya avtomobilya v srede Matlab-Simulink: Magisterskaya dissertaciya. – S.Peterburg: SPU Petra Velikogo [Popov A.V. Modeling and control of a vehicle suspension system in the Matlab-Simulink environment: Master's thesis. - St. Petersburg: SPU Peter the Great], 2018. –53p.
18. CHernyshov K.V. Uluchshenie vibrozashchitnykh svoystv i stabil'nosti harakteristik pnevmogidravlicheskih ressourcej. [Chernyshov K.V. Improvement of vibration-protective properties and characteristics of pneumohydraulic springs.] Avtoreferat diss. na soisk. uch. st. k.t.n. Volgogradskij GTU. [Abstract dissertation. for a job. uch. Art. Ph.D. Volgograd GTU], 1999. 22p.
19. ZHdanov A.A., Lipkevich D.B. AdCAS sistema avtonomnogo adaptivnogo upravleniya aktivnoj podveskoj avtomobilya [AdCAS system of autonomous adaptive control of the active suspension of the car] Trudy instituta sistemnogo programmirovaniya RAN. [Proceedings of the Institute for System Programming], 2004, t.7, pp. 119-159.
20. Rynkevich S.A. Adaptivnye sistemy upravleniya ATS [Adaptive control systems for automatic telephone exchange] Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry], 2005, № 6. – pp. 36-38.
21. Godzhaev Z.A., Sen'kevich S.E., Kuz'min V.A. Vibrozashchita gidravlicheskoj sistemy podressorivaniya mobil'nykh mashin [Vibration protection of the hydraulic suspension system of mobile machines] V sbornike: Innovacionnye idei molodykh issledovatelej dlya agropromyshlennogo kompleksa Rossii. Sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh uchenykh. [In the collection: Innovative ideas of young researchers for the agro-industrial complex of Russia. Collection of materials of the scientific-practical conference of young scientists.], 2019. – pp. 60-63.
22. Ogryzkov S.V. Ekstremal'naya sistema regulirovaniya plavnosti hoda avtomobilya [Extreme control system for the smoothness of the vehicle] Visnik SevNTU: zb. nauk. pr. Vip. 134/2012. Seriya: Mashinopriladobuduvannya ta transport. – Sevastopol' [Bulletin of SevNTU: collection of articles. sciences. Ave Vip. 134/2012. Seria: Machinery and equipment for transport. - Sevastopol], 2012. – pp. 71-74.

23. CHernyshov K.V., Pozdeev A.V., Ryabov I.M. Vibrozashchitnye svojstva podveski avtomobilya pri optimal'nom mgnovennom regulirovanii dempfirovaniya v cikle kolebanij [Vibration-protective properties of a car suspension with optimal instantaneous damping regulation in a vibration cycle] Prom-Inzhiniring: trudy V vs Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. – Chelyabinsk: Izdatel'skij centr YUUrGU [Prom-Engineering: Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference. - Chelyabinsk: SUSU Publishing Center], 2019. – pp.57-62.
24. Zakovyryn I.A., Kruglov S.P. Vopros o realizacii samonastrojki v sisteme upravleniya adaptivnoj poluaktivnoj podveski transportnogo sredstva [Elektronnyj resurs] [The question of the implementation of self-tuning in the control system of the adaptive semi-active vehicle suspension] Molodaya nauka Sibiri: elektron. nauch. zhurn. [Young Science of Siberia], – 2020. – No2(8) – Access mode: –<http://mnv.irkups.ru/toma/28-20,svobodnyj>. –Zagl. s ekrana. –YAz. rus., angl. (Accessed: 3.07.2020).
25. CHernyshov K. V. Obzor osnovnyh algoritmov regulirovaniya dempfirovaniya v podveske avtomobilya [Review of the main algorithms for damping regulation in the vehicle suspension] Simvol nauki. [Symbol of Science] – 2016. №4, ch.3. – pp. 140-144.
26. Ljung L. System Identification: Theory for the User, University of Linköping, Sweden. 1991.
27. Kruglov S.P. Modifikatsii rekurrentnogo metoda naimen'shikh kvadratov s faktorom zabyvaniya dlya funktsional'noy ustoychivosti tekushchego parametriceskogo otsenivaniya dinamicheskikh protsessov [Modifications of the rekurrent method of least squares with forgetting factor for the functional stability of the current parametrical estimation of dynamic processes] // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2019. No. 1. P. 1-12. [Accessed 22.09.20].
28. Kruglov S.P. Adaptivnaya avtomatizaciya pilotirovaniya samoletom na bol'shix uglax ataki na osnove uproshhenny`x uslovij adaptiruемости [Adaptive automation of aircraft piloting at high angles of attack based on simplified adaptability conditions], Monograph. Irkutsk, Irkutskij filial Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviicii [Irkutsk branch of the Moscow State University of Civil Aviation], 2012. 248 p.

Информация об авторах

Круглов Сергей Петрович – д. т. н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru.

Заковырин Игорь Александрович – магистрант кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ZakIgor@bk.ru.

Authors

Kruglov Sergey Petrovich – Doctor of Engineering Science, Prof., the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru.

Zakovyryn Igor Alexandrovich – post-graduate student of the Department "Automation of production processes", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: ZakIgor@bk.ru.

Для цитирования

Круглов С.П., Заковырин И.А. Управление адаптивной подвеской автомобиля на основе идентификационного алгоритма // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2020. – №3(8). – С. 29-44 – DOI: 10.26731/2658-3704.2020.3(8).29-44 – Режим доступа: <http://ismm->

For citations

Kruglov S.P., Zakovyryn I.A. Development of adaptive suspension control with a magnetic-rheological liquid based on an identification algorithm // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2020. No. 3(8). P. 29-44. DOI: 10.26731/2658-3704.2020.3(8).29-44 [Accessed 01/11/20]