

Раздел II. Вычислительные и информационно-управляющие системы

УДК 681.51

DOI 10.18522/2311-3103-2020-2-89-101

А.С. Синицын

СИНТЕЗ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАЗРЫВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ПОДВЕСКОЙ АВТОМОБИЛЯ*

Рассматривается проблема проектирования активных систем подвески транспортных средств, в которых исполнительный механизм (ИМ) не является идеальным и подвержен влиянию гистерезиса и мертвой зоны. Целью данной работы является синтез системы управления, позволяющей уменьшить влияние гистерезиса и мертвой зоны на эффективность работы системы адаптивной подвески. Параметры системы подобные гистерезису требуют значительных усилий для их идентификации и более того могут в широких пределах изменяться на протяжении жизненного цикла системы. Таким образом учесть гистерезис при синтезе системы управления является весьма трудной задачей, равно как и построение наблюдателей. Решением данной проблемы может быть применение систем разрывного управления, которые в известной мере являются робастными к параметрическим и структурным изменениям в объекте управления. Существующие подходы к синтезу систем разрывного управления опираются на линейную или линеаризованную модель объекта управления. Таким образом эффективность подобного рода систем может существенно отличаться при работе регулятора в составе реального, нелинейного объекта управления. Предлагаемая система разрывного управления позволяет снизить чувствительность системы к возмущениям, обусловленным неидеальностью ИМ, а так-же учитывает нелинейную структуру объекта управления. Эффективность замкнутой системы исследована на динамической модели построенной при помощи пакета Simulink. Предлагаемая система разрывного управления сравнивается с адаптивным синергетическим регулятором. В качестве возмущающего воздействия выбрано дорожное покрытие класса С по классификации ISO 8608. Для оценки эффективности предлагаемой системы оцениваются следующие параметры: взвешенное ускорение поддресоренной массы; относительное перемещение амортизатора и сила реакции шины. Для каждого параметра определяется среднеквадратическое и максимальное значение. Результаты численного моделирования позволяют сделать вывод что применение систем разрывного управления позволяет улучшить следующие показатели эффективности адаптивной подвески: более чем в два раза уменьшить максимальное значение взвешенного ускорения поддресоренной массы и более чем на 20 % уменьшить максимальную нагрузку на шину.

Управляемая подвеска; нелинейное управление; адаптация; синергетическая теория управления; разрывное управление.

A.S. Sinitsyn

SYNERGETIC SYNTHESIS OF SLIDING MODE CONTROL FOR VEHICLE'S ACTIVE SUSPENSION SYSTEM

This article discusses the problem of designing vehicle's active suspension systems in which the actuator is not ideal and is a subject to the influence of hysteresis and dead zone. The main goal of this work is to synthesize a control system that reduces the influence of hysteresis and dead

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00366.

zone on the efficiency of the adaptive suspension system. System parameters like hysteresis require significant efforts to identify them and, moreover, can vary widely over the life cycle of the system. Thus, it is very difficult to take into account hysteresis in the synthesis of the control system, as well as the construction of observers. The solution to this problem is use of sliding control systems, which to a certain extent are robust to parametric and structural changes in the control object. Existing approaches to the synthesis of sliding control systems are based on a linear or linearized model of the control object. Thus, the effectiveness of such systems can vary significantly when the regulator operates as part of a real, non-linear control object. The proposed sliding mode control allows to reducing sensitivity of the system to disturbances due to imperfect actuator, and also takes into account the nonlinear structure of the control object. The efficiency of a closed system is investigated on a dynamic model built in Simulink package. The proposed controller is compared with an adaptive synergetic regulator. Road of class C (according to ISO 8608 classification) was selected as a disturbance. To investigate the effectiveness of the proposed control system, the following parameters are evaluated: weighted acceleration of the sprung mass; relative motion of suspension and tire reaction force. The RMS and maximum values are calculated for each parameter. The results of numerical simulations allow to conclude that the use of sliding control systems can improve the following adaptive suspension performance indicators: reduce the maximum value of the weighted acceleration of the sprung mass by more than two times and reduce the maximum load on the tire by more than 20 %.

Active suspension; nonlinear control; adaptation; synergetic control theory; sliding mode control.

Введение. В настоящее время наблюдается большой интерес к исследованиям возможностей повышения комфортабельности движения легковых автомобилей за счет применения системы активных подвесок. Разработка систем управления активной подвеской является сложной задачей, поскольку имеют место значительные неопределенности параметров элементов подвески, поддрессоренной массы возмущающих воздействий со стороны дорожного полотна. При этом следует отметить, что модели пружин и демпферов являются нелинейными, что существенно усложняет проектирование эффективных систем управления такими системами с применением традиционных подходов теории управления. Различные подходы к управлению, такие как оптимальное управление [1], обход интегратора [2], адаптивное управление [3], нейронные сети [4], безмодельное управление [5], нелинейный компенсатор возмущений [6] – это лишь некоторые подходы, применение которых часто встречается в публикациях. В большинстве таких систем управления привод считается идеальным, что не соответствует реальности, так как практика показывает, что характеристики приводов обладают мертвой зоной, гистерезисом, насыщением, а также в таких системах присутствуют временные задержки. В отсутствие корректирующих мер эффективность замкнутой системы управления существенно снижается. Данная работа посвящена исследованию влияния мертвой зоны и гистерезиса в ИМ систем активной подвески.

Решению данной задачи посвящены множество результатов исследования с применением теории адаптивного управления [7, 8] и методов обратного управления [9], а также их комбинации. В работах [10, 11] было предложено снизить влияние мертвой зоны за счет использования её обратной модели. В работах [12, 13] предложен адаптивный регулятор с эталонной моделью, однако мертвая зона также компенсируется за счет обратной модели. Обратная модель мертвой зоны строится путем представления неизвестной мертвой зоны ограниченным возмущением, изменяющимся во времени. Обратные модели работают лучше всего, когда модель нелинейности привода полностью известна и идентифицирована.

Наличие же в системе гистерезиса может дестабилизировать систему [11], следовательно, наличие корректирующих звеньев в системе управления становится обязательным условием. Влияние гистерезиса на механические системы рассмотрено в работах [14, 15]. Хотя проблема неидеального привода в современной

литературе в основном решается с использованием нескольких методов линейного или нелинейного управления, существует также подход с использованием наблюдателей возмущения. Несмотря на то, что применение наблюдателя возмущения может с удивительной простотой компенсировать неидеальность привода, для корректной работы наблюдателя необходима модель возмущения и точные значения её параметров, получение которых связано со значительными трудностями.

Перспективным направлением решения указанной проблемы является применение систем управления с переменной структурой (sliding mode control). Наличие в системе поверхности переключения при определенных условиях обеспечивает высокую робастность системы к параметрическим и внешним возмущениям. Как было определено ранее объект управления является существенно нелинейным, следовательно, при синтезе законов управления целесообразно воспользоваться синергетической теорией управления (СТУ) [16].

Отличительными особенностями предлагаемой системы управления являются:

- ◆ индивидуальная оценка неопределенных параметров не требуется;
- ◆ не требуется знание ширины или наклона мертвой зоны, а также формы или амплитуды гистерезиса;
- ◆ знание профиля дороги не требуется, благодаря чему устраняется необходимость в датчиках предварительного просмотра дороги;
- ◆ контроллер не содержит динамических звеньев, требующих вычислений в реальном времени, что значительно снижает сложность контроллера.

Модель объекта управления. Модель одной опоры активной подвески автомобиля представлена на рис. 1. Данная модель активно использовалась в работах [7–11]. На рис. 1 обозначениям соответствуют: m_s – поддрессоренная (изолируемая) масса, представляет собой массу кузова с полезной нагрузкой; m_u – неподдрессоренная масса, представляет собой массу колеса в сборе с амортизатором; F_d и F_s обозначают силы, производимые амортизатором и пружиной соответственно, F_t , F_b – силы упругости и демпфирования шины.

Перемещение поддрессоренной массы обозначено как z_s , неподдрессоренной – z_u , а «перемещение» дорожного покрытия – z_r . Управляющее воздействие обозначено как u .

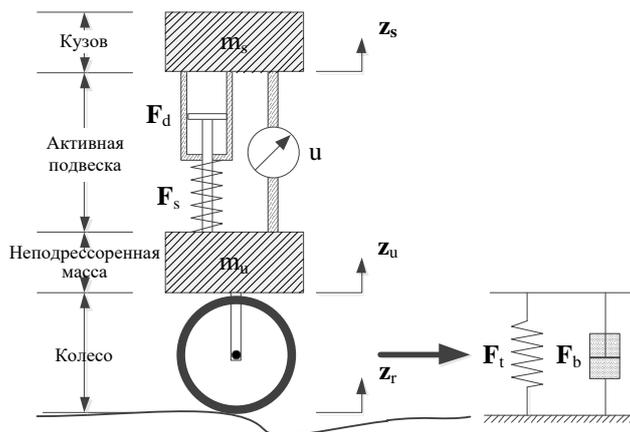


Рис. 1. Модель одной опоры активной подвески автомобиля

Динамика перемещения кузова и неподдрессоренной массы описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s + F_d(\dot{z}_s, \dot{z}_u, t) + F_s(z_s, z_u, t) &= N(u), \\ m_u \ddot{z}_u - F_d(\dot{z}_s, \dot{z}_u, t) - F_s(z_s, z_u, t) + F_t(z_u, z_r, t) + F_b(\dot{z}_u, \dot{z}_r, t) &= -N(u), \end{aligned} \quad (1)$$

где $N(u)$ – сила, производимая исполнительным механизмом. Силы, производимые нелинейно упругой пружиной, кусочно-линейным амортизатором и шиной заданы в следующем виде:

$$\begin{aligned} F_s(z_s, z_u, t) &= k_s(z_s - z_u) + k_{sn}(z_s - z_u)^3, \\ F_d(\dot{z}_s, \dot{z}_u, t) &= \begin{cases} b_e(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \\ b_c(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \end{cases}, \\ F_t(z_u, z_r, t) &= k_f(z_u - z_r), \\ F_b(\dot{z}_u, \dot{z}_r, t) &= b_f(\dot{z}_u - \dot{z}_r), \end{aligned} \quad (2)$$

где k_s и k_{sn} – линейный и нелинейный коэффициенты упругости; b_e и b_c – коэффициенты демпфирования амортизатора на ходе расширения и сжатия соответственно, k_f и b_f – коэффициенты упругости и демпфирования шины.

Определим переменные состояния:

$$x_1 = z_s, x_2 = \dot{z}_s, x_3 = z_u, x_4 = \dot{z}_u, \quad (3)$$

таким образом, дифференциальные уравнения (1) могут быть трансформированы в модель, записанную в пространстве состояний:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m_s}(-F_d(\dot{z}_s, \dot{z}_u, t) - F_s(z_s, z_u, t) + N(u)), \\ \dot{x}_3 &= x_4, \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{m_u}(F_d(\dot{z}_s, \dot{z}_u, t) + F_s(z_s, z_u, t) - F_t(z_u, z_r, t) - F_b(\dot{z}_u, \dot{z}_r, t) - N(u)). \end{aligned} \quad (4)$$

Для краткости записи далее будут использованы сокращенные обозначения сил F_s , F_d , F_t , F_b без явного указания аргументов.

Неидеальный привод. Привод, обозначенный как $N(u)$ в уравнениях (4), является неидеальным приводом. Предполагается, что на него влияет мертвая зона или гистерезис. Сила, производимая ИМ, обозначается как $N(u)$. Входное воздействие обозначено как u . В работах [10, 17] выход ИМ при наличии мертвой зоны описывается уравнением:

$$N(u) = p_s u + d_d, \quad (5)$$

где

$$d_d \begin{cases} -mb_r, & \text{если } u \geq b_r \\ -mu, & \text{если } b_l < u < b_r \\ -mb_l, & \text{если } u \leq b_l \end{cases}, \quad (6)$$

где p_s – псевдо-наклон мертвой зоны, $b_r > 0$, $b_l < 0$ – границы мертвой зоны. При наличии гистерезиса выход привода может быть задан уравнением [14, 15, 18]:

$$N(u) = \mu_1 u + \mu_2 d_h, \quad (7)$$

где $\mu_1 > 0$, $\mu_2 > 0$ – коэффициенты жесткости, d_h – вспомогательная переменная, описываемая дифференциальным уравнением:

$$\dot{d}_h = \dot{u} - \gamma | \dot{u} | | d_h |^{n-1} - \alpha i | d_h |^n, d_h(0) = 0, \quad (8)$$

где γ , n , α – положительные коэффициенты, определяющие форму и ширину петли гистерезиса. Коэффициенты, фигурирующие в уравнениях (5)–(8) могут быть оценены лишь приблизительно и более того, могут меняться в процессе функционирования системы, что существенно осложняет синтез точного наблюдателя.

Критерии эффективности. Пространство между подрессоренной и неподдресоренной массой называется рабочим. Относительное перемещение амортизатора подвески, определяется выражением:

$$\xi = \frac{x_1 - x_3}{x_r}, \quad (9)$$

где x_r – максимально допустимое перемещение.

Относительная реакция шины, обозначаемая как ψ_t , определяется как отношение динамического усилия шины к статическому:

$$\psi_t = \frac{F_t(z_u, z_r, t) - F_b(\dot{z}_u, \dot{z}_r, t)}{(m_s + m_{us})g}. \quad (10)$$

Относительное перемещение амортизатора и относительная реакция шины выступают в роли критериев безопасности. Обе величины должны быть по модулю меньше единицы, чтобы гарантировать удержание дороги.

В ISO 2631 [19] установлено, что организм человека более чувствителен к ускорению в диапазоне 4–8 Гц. Наиболее простой способ найти средневзвешенное среднеквадратичное ускорение – фильтрация сигнала ускорения подрессоренной массы через полосовые фильтры. Фильтр, соответствующий стандарту ISO 2631 приведен в работах [20, 21] и имеет вид:

$$W(s) = \frac{87,72s^4 + 1138s^3 + 11336s^2 + 5453s + 5509}{s^5 + 92,6854s^4 + 2649,83s^3 + 25969s^2 + 81057s + 79783}. \quad (11)$$

Цели управления. Цель системы управления состоит в том, чтобы минимизировать \dot{x}_2 в условиях неопределенностей в элементах подвески и внешних возмущений. При этом желательно удерживать кузов в заданном положении при выполнении условий $|\psi_t| < 1$, $|\xi| < 1$.

Синтез адаптивного закона управления. Приступая к синтезу системы управления методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), в первую очередь необходимо определить форму инварианта, погружаемого в систему. Инвариантное многообразие должно отражать требования к закону управления и при этом не должно содержать переменных состояния, которые недоступны прямому измерению, в данном случае такой переменной является z_r – профиль дороги. Измерение данной переменной не представляется возможным, а построение точного наблюдателя осложнено непредсказуемостью данного воздействия. Исходя из требований к системе управления, сформируем целевое многообразие в следующем виде:

$$x_2 + k_1 x_1 = 0, \quad (12)$$

где k_1 – ненулевая положительная константа.

Определившись с формой инвариантного многообразия, перейдем к синтезу закона управления, гарантирующего его погружение в управляемый объект. Нам известно, что в исходной системе имеется параметрическое возмущение, которое выражается в наличии гистерезиса и мертвой зоны в ИМ. Для обеспечения адаптации регулятора к возмущениям введем в регулятор одно интегрирующее звено вида:

$$\dot{v} = c_1(x_2 + k_1 x_1), \quad (13)$$

где c_1 – положительная константа.

Для синтеза закона управления запишем макропеременную следующего вида:

$$\psi = x_2 + k_1 x_1 + v. \quad (14)$$

Составим дифференциальное уравнение, описывающее движение изображающей точки системы (4) из исходного пространства состояний к инвариантному многообразию (12) [22, 23]:

$$T\dot{\psi}(t) + \psi = 0, \quad (15)$$

где T – положительная константа. Следуя процедуре метода АКАР, продифференцируем уравнение (14) по времени с учетом системы дифференциальных уравнений (4):

$$\dot{\psi}(t) = \frac{-F_d - F_s + N(u)}{m_s} + c_1(x_2 + k_1 x_1) + k_1 x_2. \quad (16)$$

Искомый закон управления является решением (15) относительно $N(u)$:

$$N(u) = -\frac{m_s((1+T)k_1 + 1 + c_1 T)x_2 + c_1 T k_1 + v}{T} + F_d + F_s. \quad (17)$$

Характерной особенностью найденного закона управления (13), (17) является адаптивность к любым полиномиальным возмущениям нулевого порядка. Эта особенность гарантирует, что инвариантное отношение (12) будет выполняться даже в условиях неточного определения параметров, страдать при этом будет лишь качество переходного процесса системы из исходного состояния к аттрактору.

Синтез системы разрывного управления. Согласно процедуре, изложенной в [22, 23] формируем поверхность переключения, отражающую технологическую задачу системы управления:

$$s = x_2 + k_1 x_1. \quad (18)$$

Введем агрегированную макропеременную следующего вида:

$$\psi = x_1^2 \beta_1 + \beta_2 |s|, \quad (19)$$

где β_1, β_2 – постоянные коэффициенты. Продифференцировав (19) по времени

$$\dot{\psi} = 2\beta_1 x_1 x_2 + \beta_2 \text{sign}(s) \dot{s} \quad (20)$$

и воспользовавшись функциональным уравнением (15) можно получить управляющее воздействие, гарантирующее попадание изображающей точки системы (4) на поверхность переключения $s = 0$:

$$N(u) = \frac{T\beta_2(-m_s k_1 x_2 + F_s + F_d) \text{sign}(s) - m_s(\beta_2 |x_2 + k_1 x_1| + \beta_1 x_1(x_1 + 0,5Tx_2))}{T\beta_2 \text{sign}(s)}. \quad (21)$$

Условием возникновения скользящего режима на поверхности $s = 0$ является [22]:

$$s \cdot \dot{s} < 0. \quad (22)$$

Разрешив правую часть уравнения (20) относительно \dot{s} и подставив результат в (22) запишем условия возникновения скользящего режима:

$$\frac{-\beta_1 - \beta_2 + 2\beta_1 kT}{T\beta_2} < 0. \quad (23)$$

Исследование синтезированной системы управления. Проведем исследование эффективности полученных результатов средствами численного моделирования замкнутой системы. Для наглядной демонстрации отличительных особенностей синтезированного разрывного управления (21) проводится его сравнение с нелинейным адаптивным законом (17). Параметры модели одной амортизационной опоры системы активной подвески автомобиля приведены в табл. 1, а параметры исследуемых законов управления приведены в табл. 2.

Таблица 1

Значения параметров модели активного амортизатора

Параметр	Значение	Параметр	Значение
m_s	600 кг	k_f	200 000 Н/м
m_u	60 кг	b_f	1 000 Н·с/м
k_s	18 000 Н/м	b_e	2 500 Н·с/м
k_{sn}	1 000 Н/м	b_c	2 200 Н·с/м
b_t	-3	b_r	2
γ	1	α	1
n	1	μ_2	1

Таблица 2

Значения параметров исследуемых систем управления

Параметр	Значение	Параметр	Значение
T	0,1	c_1	0,1
k_1	50	β_1	1000
β_2	$1e^{-6}$		

При моделировании будем полагать, что возмущающее воздействие представляет собой дорожное покрытие класса С по классификации ISO 8608 [24]:

$$\dot{z}_r = -\delta V z_r + \omega, \quad (24)$$

где $V = 30$ м/с – скорость автомобиля, ω – случайное возмущающее воздействие со спектральной плотностью мощности Φ_0 . Для дорожного покрытия С класса стандартом ISO 8608 определены следующие параметры: $\Phi_0 = 16 \times 10^{-6}$ м³, $\delta = 0,127$. Результаты моделирования замкнутой системы с различными системами управления при наличии в системе неучтенной зоны нечувствительности представлены на рис. 2–5.

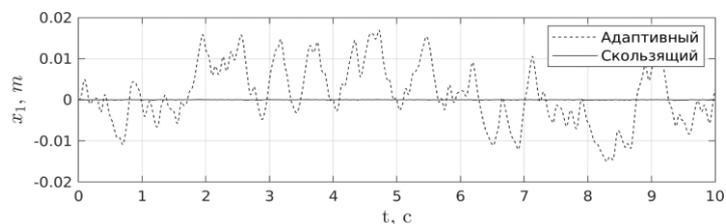


Рис. 2. Перемещение подрессоренной массы в случае наличия мертвой зоны

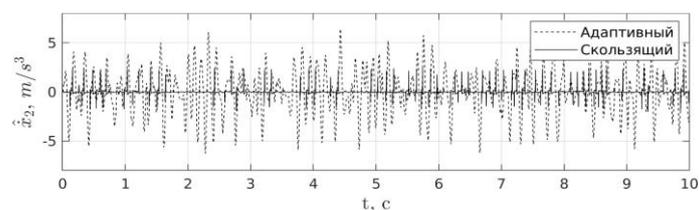


Рис. 3. Взвешенная оценка ускорения подрессоренной массы в случае наличия мертвой зоны

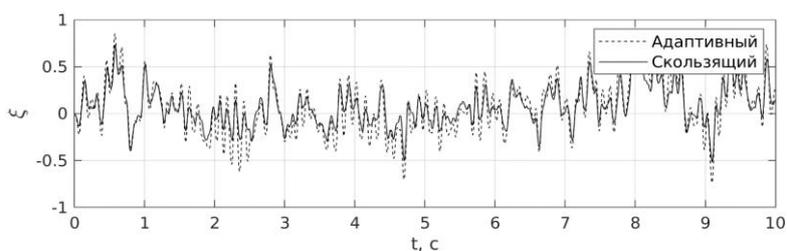


Рис. 4. Относительное перемещение амортизатора в случае наличия мертвой зоны

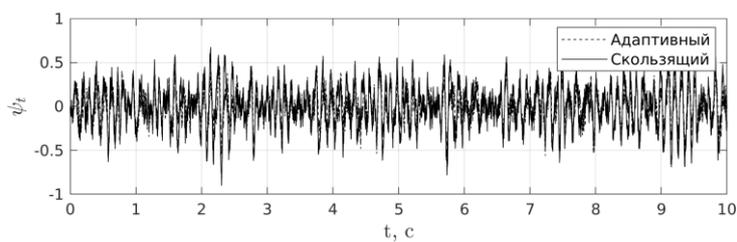


Рис. 5. Относительная реакция шины в случае наличия мертвой зоны

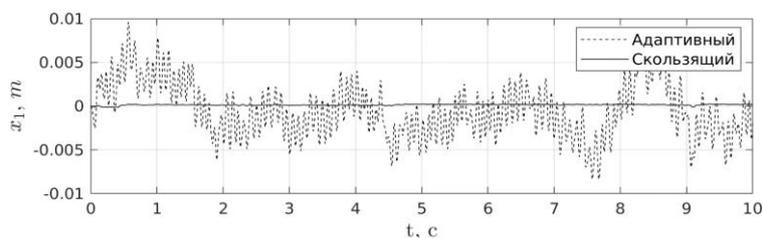


Рис. 6. Перемещение подрессоренной массы в случае наличия гистерезиса

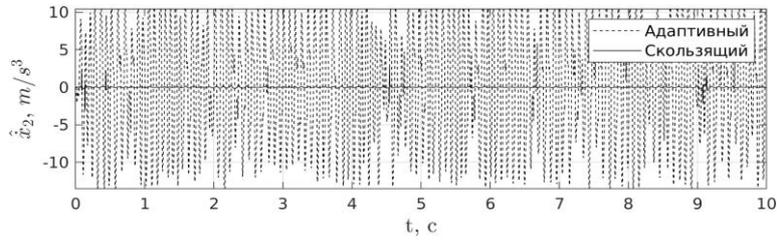


Рис. 7. Взвешенная оценка ускорения подрессоренной массы в случае наличия гистерезиса

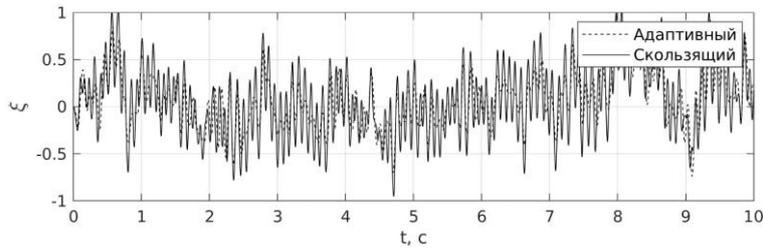


Рис. 8. Относительное перемещение амортизатора в случае наличия гистерезиса

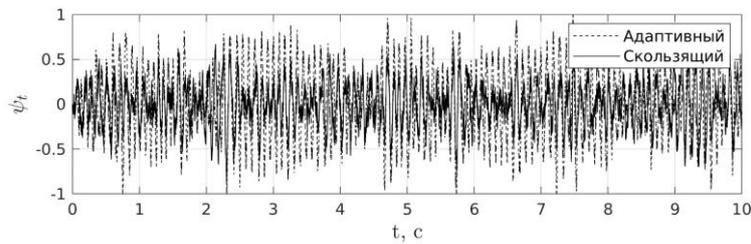


Рис. 9. Относительная реакция шины в случае наличия гистерезиса

Результаты моделирования замкнутой системы с различными системами управления при наличии в системе гистерезиса представлены на рис. 6–9.

Результаты оценки показателей эффективности системы представлены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели эффективности

Тип звена	Регулятор	Взвешенное ускорение		Относительное перемещение		Относительная реакция шины	
		$\max \hat{x}_2 $	СКО	$\max \xi $	СКО	$\max \psi_t $	СКО
Мертвая зона	Адаптивный	6,414	2,247	0,828	0,214	0,903	0,239
	Скользящий	2,560	0,227	0,91	0,283	0,585	0,171
Гистерезис	Адаптивный	15,105	7,697	0,922	0,283	1,048	0,391
	Скользящий	3,004	0,103	0,998	0,350	0,892	0,238

Для более наглядной демонстрации отличительных особенностей исследуемых законов управления средневладратические значения оценок табл. 3 проиллюстрированы на рис. 10, 11.

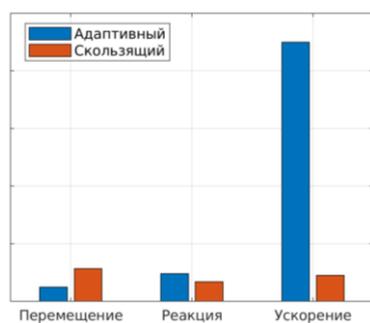


Рис. 10. Результаты оценки показателей эффективности при наличии мертвой зоны

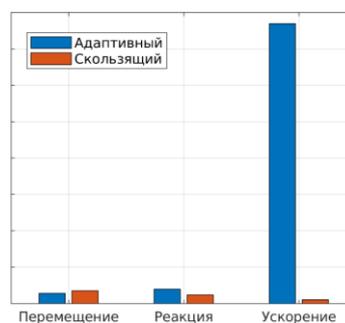


Рис. 11. Результаты оценки показателей эффективности при наличии гистерезиса

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что скользкий регулятор значительно превосходит адаптивный закон управления в части изоляции кузова автомобиля от ударов и вибраций, вызванных неровностями дорожного покрытия. Скользящий регулятор также обеспечивает большую безопасность движения транспортного средства, что следует из меньшего значения относительной реакции шины. Следует отметить, что при использовании скользкого регулятора увеличивается относительное перемещение амортизатора, что обусловлено противоречием между требованием к максимальной неподвижности кузова автомобиля и минимизацией перемещения амортизатора.

Заключение. В работе предложен скользкий синергетический регулятор для системы адаптивной подвески, который базируется на современной концепции синергетического управления. Синтезированный закон управления позволяет обеспечить стабилизацию изолируемой массы в нулевом положении из любых, физически приемлемых начальных условий. Введение в систему поверхности переключения позволяет добиться высокого уровня робастности системы и значительно увеличить показатели эффективности системы в условиях неопределенностей в исполнительном механизме, а использование метода АКАР – учесть всю доступную информацию о динамике объекта управления. Сравнение полученного регулятора и адаптивной системы управления, синтезированной на основе метода АКАР, показывает, что предложенная система разрывного управления позволяет повысить следующие характеристики системы адаптивной подвески:

- 1) более чем в 2 раза уменьшить амплитуду взвешенного ускорения поддрессоренной массы и более чем на порядок уменьшить СКО при наличии мертвой зоны в исполнительном механизме подвески;
- 2) более чем на 30 % уменьшить максимальную силу реакции шины и СКО при наличии мертвой зоны в исполнительном механизме подвески;
- 3) более чем в 5 раза уменьшить амплитуду взвешенного ускорения поддрессоренной массы и более чем на порядок уменьшить СКО при наличии гистерезиса в исполнительном механизме подвески;
- 4) на 15 % уменьшить максимальную и на 39 % СКО силы реакции шины при наличии гистерезиса в исполнительном механизме подвески.

Уменьшение амплитуды и ускорения поддрессоренной массы приводит к повышению комфорта, а уменьшение нормальной реакции шины уменьшает ее износ и повышает управляемость автомобиля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hrovat D.* Survey of advanced suspension developments and related optimal control applications // *Automatica*. – 1997. – Vol. 33, No. 10. – P. 1781-1817.
2. *Yagiz N., Hacıoglu Y.* Backstepping control of a vehicle with active suspensions // *Contr. Eng. Pract.* – 2008. – Vol. 16, No. 12. – P. 1457-1467.
3. *Koch G., Spirk S., Pellegrini E., Pletschen N., Lohmann B.* Experimental validation of a new adaptive control approach for a hybrid suspension system // *American Control Conference 2011, June 29-July 1, San Francisco, California, USA*. – San Francisco, 2011. – P. 4580-4585.
4. *Zhao F., Ge S.S., Tu F., Qin Y., Dong M.* Adaptive neural network control for active suspension system with actuator saturation // *IET Control Theory & Appl.* – 2016. – Vol. 10, No. 14. – P. 1696-1705.
5. *Jue W., Jing Z.* Model-free tracking control for vehicle active suspension systems // *34th Chinese Control Conference (CCC), July 28-30, Hangzhou, China*. – Hangzhou, 2015. – Vol. 10, No. 14. – P. 1696-1705.
6. *Deshpande V.S., Shendge P.D., Phadke S.B.* Dual objective active suspension system based on a novel nonlinear disturbance compensator // *Veh. Syst. Dyn.* – 2016. – Vol. 54, No. 9. – P. 1269-1290.
7. *Hu C., Yao B., Wang Q.* Adaptive robust precision motion control of systems with unknown input dead-zones: a case study with comparative experiments // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2016. – Vol. 58, No. 6. – P. 2454-2464.
8. *Ahmad N.J., Ebraheem H.K., Alnaser M.J., Alostath J.M.* Adaptive control of a dc motor with uncertain deadzone nonlinearity at the input // *Control and Decision Conference (CCDC), Dec 12-15, Orlando, FL, USA*. – Orlando, 2011. – P. 4295-4299.
9. *Tao G., Taware A.* Control by Compensation of Nonlinearities // *Control Systems, Robotics and Automation*. – 2009. – Vol. III. – P. 165-171.
10. *Recker D., Kokotovic P., Rhode D., Winkelmann J.* Adaptive nonlinear control of systems containing a deadzone // *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 11-13, Brighton, England*. – Brighton, 1991. – P. 2111-2115.
11. *Dong J., Mo B.* The adaptive PID controller design for motor control system with backlash // *Fourth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), June 12-13, Beijing, China*. – Beijing, 2013. – P. 59-63.
12. *Tao G., Kokotovic P.V.* Adaptive control of plants with unknown dead-zones // *IEEE Trans. Automat. Contr.* – 1994. – Vol. 39, No. 1. – P. 59-68.
13. *Chang T., Yuan D., Hanek H.* Matched feedforward/model reference control of a high precision robot with dead-zone // *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.* – 2008. – Vol. 16, No. 1. – P. 94-102.
14. *Danilin N.A., Shalashilin D.A.* Hysteresis Modelling of Mechanical Systems at Nonstationary Vibrations // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1-15.
15. *Solomon O.* Some typical shapes of hysteretic loops using the bouc-wen model, *Journal of Information Systems & Operations Management*. – 2013. – Vol. 7, No. 1. – P. 1-9.
16. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
17. *Tao G., Kokotovic P.V.* Adaptive Control of Systems with Actuator and Sensor Nonlinearities. – NY.: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
18. *Pan H., Sun W., Jing X., Gao H., Yao J.* Adaptive tracking control for active suspension systems with non-ideal actuators // *J. Sound Vib.* – 2017. Vol. 399, No. 1. – P. 2-20.
19. ISO-2631, Mechanical Vibration and Shock: Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration Part 1, General Requirements, ISO, Geneva.
20. *Zuo L., Nayfeh S.A.* Low order continuous-time filters for approximation of the ISO 2631-1 human vibration sensitivity weightings // *J. Sound Vib.* – 2003. – Vol. 265, No. 1. – P. 459-465.
21. *Deshpande V.S., Shendge P.D., Phadke S.B.* Nonlinear control for dual objective active suspension systems // *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* – 2017. – Vol. 18, No. 3. – P. 656-665.
22. *Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. и др.* Синергетические методы управления сложными системами: Механические и электромеханические системы / под общей ред. А.А. Колесникова. – Изд. стереотип. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 304 с.
23. *Колесников А.А., Веселов Г.Е.* Синергетический принцип иерархизации и аналитический синтез регуляторов взаимосвязанных электромеханических систем // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2001. – № 5 (23). – С. 80-99.
24. ISO-8608, Mechanical Vibration-road Surface Profiles-reporting of Measured Data, ISO, Geneva.

REFERENCES

1. Hrovat D. Survey of advanced suspension developments and related optimal control applications, *Automatica*, 1997, Vol. 33, No. 10, pp. 1781-1817.
2. Yagiz N., Hacıoglu Y. Backstepping control of a vehicle with active suspensions, *Contr. Eng. Pract.*, 2008, Vol. 16, No. 12, pp. 1457-1467.
3. Koch G., Spirk S., Pellegrini E., Pletschen N., Lohmann B. Experimental validation of a new adaptive control approach for a hybrid suspension system, *American Control Conference 2011, June 29-July 1, San Francisco, California, USA*. San Francisco, 2011, pp. 4580-4585.
4. Zhao F., Ge S.S., Tu F., Qin Y., Dong M. Adaptive neural network control for active suspension system with actuator saturation, *IET Control Theory & Appl.*, 2016, Vol. 10, No. 14, pp. 1696-1705.
5. Jue W., Jing Z. Model-free tracking control for vehicle active suspension systems, *34th Chinese Control Conference (CCC), July 28-30, Hangzhou, China*. Hangzhou, 2015, Vol. 10, No. 14, pp. 1696-1705.
6. Dshpande V.S., Shendge P.D., Phadke S.B., Dual objective active suspension system based on a novel nonlinear disturbance compensator, *Veh. Syst. Dyn.*, 2016, Vol. 54, No. 9, pp. 1269-1290.
7. Hu C., Yao B., Wang Q. Adaptive robust precision motion control of systems with unknown input dead-zones: a case study with comparative experiments, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2016, Vol. 58, No. 6, pp. 2454-2464.
8. Ahmad N.J., Ebraheem H.K., Alnaser M.J., Alostath J.M. Adaptive control of a dc motor with uncertain deadzone nonlinearity at the input, *Control and Decision Conference (CCDC), Dec 12-15, Orlando, FL, USA*. Orlando, 2011, pp. 4295-4299.
9. Tao G., Taware A. Control by Compensation of Nonlinearities // *Control Systems, Robotics and Automation*, 2009, Vol. III, pp. 165-171.
10. Recker D., Kokotovic P., Rhode D., Winkelman J. Adaptive nonlinear control of systems containing a deadzone, *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 11-13, Brighton, England*. Brighton, 1991, pp. 2111-2115.
11. Dong J., Mo B. The adaptive PID controller design for motor control system with backlash, *Fourth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), June 12-13, Beijing, China*. Beijing, 2013, pp. 59-63.
12. Tao G., Kokotovic P.V. Adaptive control of plants with unknown dead-zones, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1994, Vol. 39, No. 1, pp. 59-68.
13. Chang T., Yuan D., Hanek H. Matched feedforward/model reference control of a high precision robot with dead-zone, *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, 2008, Vol. 16, No. 1, pp. 94-102.
14. Danilin N.A., Shalashilin D.A. Hysteresis Modelling of Mechanical Systems at Nonstationary Vibrations, *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, Vol. 2018, pp. 1-15.
15. Solomon O. Some typical shapes of hysteretic loops using the bouc-wen model, *Journal of Information Systems & Operations Management*, 2013, Vol. 7, No. 1, pp. 1-9.
16. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya [Synergetic control theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1994.
17. Tao G., Kokotovic P.V. Adaptive Control of Systems with Actuator and Sensor Nonlinearities. NY.: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
18. Pan H., Sun W., Jing X., Gao H., Yao J. Adaptive tracking control for active suspension systems with non-ideal actuators, *J. Sound Vib.*, 2017, Vol. 399, No. 1, pp. 2-20.
19. ISO-2631, Mechanical Vibration and Shock: Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration Part 1, General Requirements, ISO, Geneva.
20. Zuo L., Nayfeh S.A. Low order continuous-time filters for approximation of the ISO 2631-1 human vibration sensitivity weightings, *J. Sound Vib.*, 2003, Vol. 265, No. 1, pp. 459-465.
21. Dshpande V.S., Shendge P.D., Phadke S.B. Nonlinear control for dual objective active suspension systems, *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, 2017, Vol. 18, No. 3, pp. 656-665.
22. Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N. i dr. Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: Mekhanicheskie i elektromekhanicheskie sistemy [Synergetic control methods of complex systems: Mechanical and Electromechanical systems], under the General ed. of A.A. Kolesnikova. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2013, 304 p.

23. Kolesnikov A.A., Veselov G.E. Sinergeticheskiy printsip ierarkhizatsii i analiticheskiy sintez regulyatorov vzaimosvyazannykh elektromekhanicheskikh sistem [Synergetic principle of hierarchy and analytical synthesis of regulators of interconnected Electromechanical systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2001, No. 5 (23), pp. 80-99.
24. ISO-8608, Mechanical Vibration-road Surface Profiles-reporting of Measured Data, ISO, Geneva.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.Б. Чернышов.

Синицын Александр Сергеевич – АО «Научно-конструкторское бюро вычислительных систем» (АО НКБ ВС); e-mail: axeom18@gmail.com; 347936, г. Таганрог, ул. 1-я Линия, 144-а; тел.: +78634682560, доб. 4760; Отдел алгоритмического обеспечения встроенных систем управления; научный сотрудник.

Sinitsyn Alexander Sergeevich – Joint Stock Company "Scientific Design Bureau of Computing Systems" (JSC SDB CS); e-mail: axeom18@gmail.com; 1 Liniya St., 144-a, Taganrog, 347936, Russia; phone: +78634682560, ad. 4760; the department of algorithmic support for embedded control systems; researcher.

УДК 681.51

DOI 10.18522/2311-3103-2020-2-101-112

Г.Е. Веселов, Алин Ингабире

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ БПЛА В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ С ВХОДНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ*

Рассматривается применение методов синергетической теории управления (СТУ) к проблеме синтеза системы управления беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) в условиях действия ветровых возмущений. Основной задачей исследования является разработка синергетического метода синтеза нелинейных систем управления БПЛА с жёстким крылом, гарантирующих асимптотическую устойчивость замкнутых систем при движении по заданной траектории, устойчивость и адаптивность при значительной нелинейности математических моделей управления БПЛА с жёстким крылом в условиях влияния ветровых возмущений. Кроме того, важной задачей при синтезе систем управления различными объектами, в том числе и БПЛА, является учёт ограничений на переменные состояния объекта управления, которые могут обуславливаться как требованиями к энергоэффективности и безопасности систем, так и другими ограничениями и требованиями, накладываемые на эти координаты. В статье предлагается процедура синтеза нелинейных векторных систем управления БПЛА с жёстким крылом методами СТУ, обеспечивающих инвариантность к действию внешних неизмеряемых возмущающих воздействий, выполнение заданных технологических целей управления, асимптотическую устойчивость замкнутой системы, а также учёт введенных ограничений на внутренние координаты БПЛА. Предлагаемая в статье процедура синергетического синтеза векторных нелинейных систем управления БПЛА с жёстким крылом гарантирует эффективное использование такого типа БПЛА в решении различного рода задач, в том числе и при функционировании таких БПЛА в качестве элементов группы автономных объектов, решающих заданную групповую технологическую задачу. Эффективность предлагаемого подхода к синергетическому синтезу стратегий управления подтверждается результатами компьютерного моделирования синтезированной нелинейной векторной системы управления БПЛА с жёстким крылом. Предлагаемый метод синергетического синтеза системы управления БПЛА с жёстким крылом, может быть применён для разработки перспективных имитационных пилотажно-навигационных комплексов, моделирующих поведение БПЛА в условиях присутствия ветровых возмущений и послужить основой для улучшения лётно-технических характеристик БПЛА.

БПЛА с жёстким крылом; синергетическая теория управления; инвариантное многообразие; ветровые возмущения; инвариантность к внешним неизмеряемым возмущениям; ограничения на переменные пространства состояния объекта управления.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00645.