

УДК 629.33

Сергей Вячеславович Борисов, канд. тех. наук, доц.,

МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, sv-brisov@mail.ru

Михаил Станиславович Камитов, студент,

МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, mkamitov@yandex.ru

Владислав Иванович Осипов, канд. тех. наук, проф.,

МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, osipov.vladislav@ro.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АМОРТИЗАТОРА

Аннотация. В статье описан метод оптимизации нелинейной характеристики амортизатора по критерию минимизации ускорения поддрессоренной массы автомобиля. Автомобиль представлен в виде двухмассовой модели. Характеристика амортизатора представлена кусочно-линейной функцией. С целью построения оптимизированной характеристики амортизатора выполнен полный факторный эксперимент при одновременном варьировании коэффициентов сопротивления на различных участках характеристики амортизатора. При проведении полного факторного эксперимента рассчитывались зависимости амплитуды ускорения поддрессоренной массы от частоты возмущающего воздействия, по которым вычислялся интегральный показатель плавности хода. Оптимизированная характеристика амортизатора построена путем минимизации этого показателя.

Ключевые слова: плавность хода автомобиля, нелинейная характеристика амортизатора, полный факторный эксперимент, интегральный показатель плавности хода.

Sergey V. Borisov, Ph. D., associate professor,

MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, sv-brisov@mail.ru

Mikhail S. Kamitov, student,

MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, mkamitov@yandex.ru

Vladislav I. Osipov, Ph. D., professor,

MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, osipov.vladislav@ro.ru

OPTIMIZATION OF THE NONLINEAR SHOCK ABSORBER CHARACTERISTIC

Abstract. A method of optimization of nonlinear shock absorber characteristic by minimization of sprung weight acceleration is proposed. The quarter car model is considered in the paper. Shock absorber characteristic is represented by piecewise-linear function. To find out the optimized characteristic of the shock absorber, the complete factorial experiment for four parameters of the shock absorber has been done. To evaluate the integral ride comfort index, sprung weight frequency responses have been calculated. Optimized characteristic of the shock absorber is determined by minimization of this index.

Key words: vehicle ride comfort, nonlinear shock absorber characteristic, complete factorial experiment, integral ride comfort index.

Введение

Целью данной работы являлась оптимизация нелинейной характеристики амортизатора по критерию плавности хода автомобиля. Характеристика амортизатора моделировалась кусочно-линейной функцией (см. рис. 2).

Основная часть

Для проведения исследований была использована двухмассовая модель автомобиля, в которой все упругие и демпфирующие характеристики были приняты линейными, за исключением характеристики амортизатора.

Дифференциальные уравнения колебаний автомобиля для двухмассовой расчетной схемы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} M\ddot{z} &= -C_{\pi}(z - z_1) - R_{\pi}(\dot{z} - \dot{z}_1); \\ m\ddot{z}_1 &= -C_{\pi}(z_1 - q) - R_{\pi}(\dot{z}_1 - \dot{q}) + C_{\pi}(z - z_1) + R_{\pi}(\dot{z} - \dot{z}_1). \end{aligned}$$

Возмущающее воздействие от дороги моделировалось синусоидальной функцией:

$$q_k(t) = h_k \sin(\omega t),$$

где $\omega = \lambda V$, $\lambda = 2\pi/l$ – дорожная частота, V – скорость автомобиля, l – длина неровности.

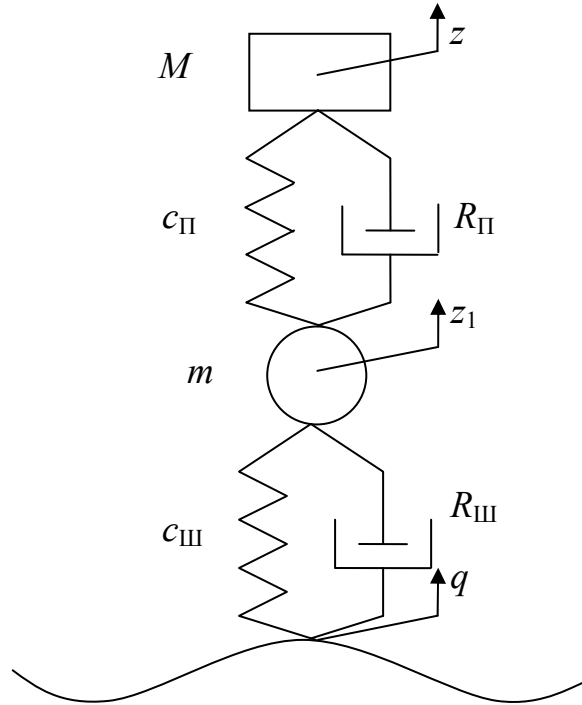


Рис. 1. Двухмассовая модель автомобиля: m – неподдрессоренная масса, M – поддрессоренная масса, C_n – жесткость подвески, $C_{ш}$ – жесткость шины, R_n – коэффициент сопротивления амортизатора, $R_{ш}$ – коэффициент сопротивления шины

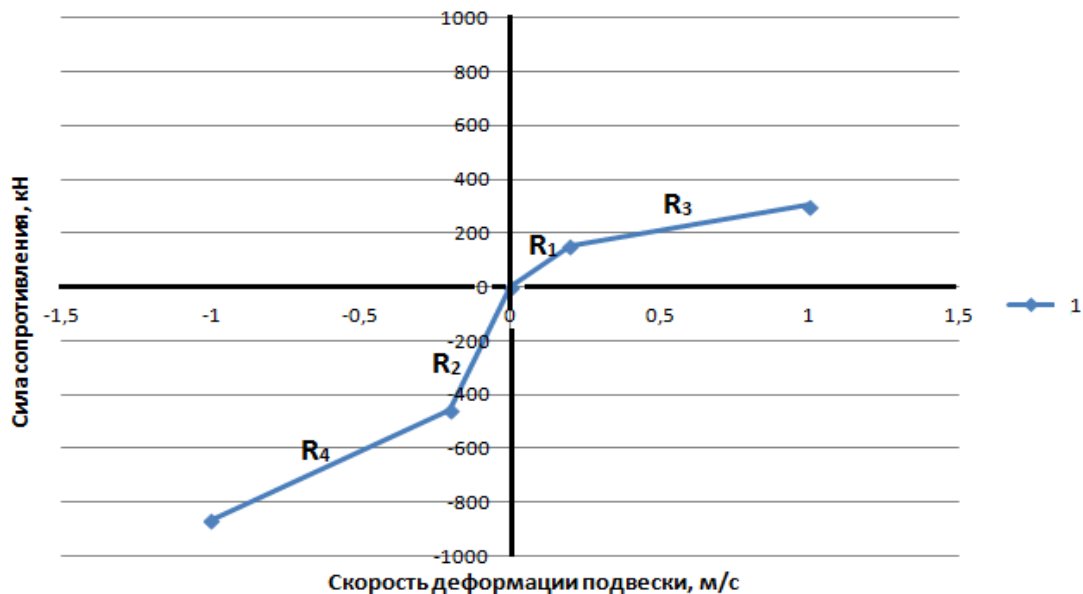


Рис. 2. Характеристика амортизатора: R_1 , R_2 , R_3 и R_4 – коэффициенты сопротивления амортизатора на соответствующих участках

С целью приближения условий вычислительного эксперимента к реальному распределению ординат неровностей в зависимости от их длины высота неровности h_k назначалась в зависимости от длины неровности. Для определения высот неровности h_k была использована спектральная плотность ординат микропрофиля следующего вида:

$$K_q(\lambda) = D_0/\lambda^2.$$

Значение коэффициента уровня спектра D_0 было выбрано равным 25,12, что соответствует верхней границе класса В по классификации ISO. Высота неровности h_k вычислялась следующим образом. Область значений дорожной частоты λ , влияющих на колебания автомобиля, была разбита на третьоктавные диапазоны, в каждом из которых была вычислена дисперсия по формуле:

$$D_{qk} = D_0(1/\lambda_{\min k} - 1/\lambda_{\max k})/\pi.$$

Тогда, исходя из представления дисперсии как среднего по аргументу, амплитуду синусоидальной функции, т.е. высоту неровности, можно рассчитать по следующей формуле:

$$h_k = \sqrt{2D_{qk}}.$$

Таким образом, чем меньше длина неровности и соответственно больше частота возмущающего воздействия, тем меньше высота неровности h_k .

В ходе выполнения полного факторного эксперимента, при проведении которого варьировались значения коэффициентов R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , рассчитывались зависимости амплитуды ускорения поддрессоренной массы от частоты возмущающего воздействия. На рисунке 3 приведены такие характеристики для некоторых вариантов комбинации значений коэффициентов R_1 , R_2 , R_3 и R_4 .

Для оценки плавности хода автомобиля использовался следующий интегральный показатель:

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n A_{z_i}^2}.$$

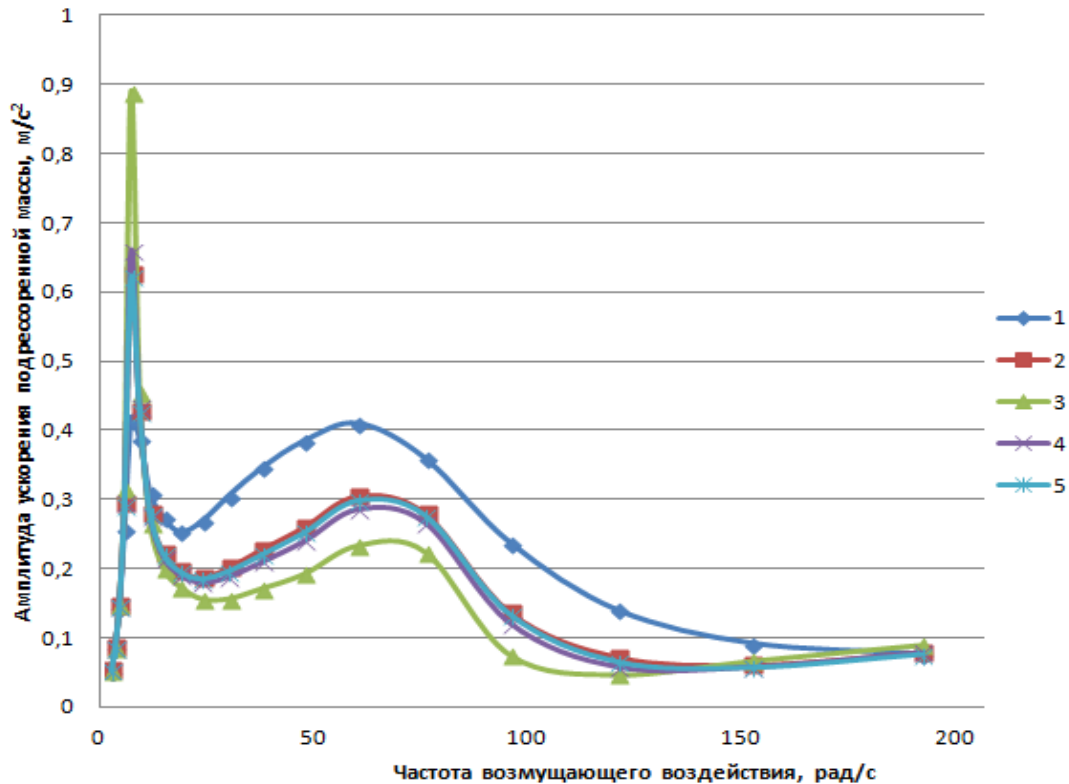


Рис. 3. Зависимости амплитуды ускорения поддрессоренной массы от частоты возмущающего воздействия:

- 1 – $R_1 = 760$; $R_2 = 2290$; $R_3 = 190$; $R_4 = 510$;
 2 – $R_1 = 460$; $R_2 = 1400$; $R_3 = 120$; $R_4 = 300$;
 3 – $R_1 = 305$; $R_2 = 916$; $R_3 = 76$; $R_4 = 203$;
 4 – $R_1 = 530$; $R_2 = 1190$; $R_3 = 120$; $R_4 = 300$;
 5 – $R_1 = 560$; $R_2 = 1280$; $R_3 = 120$; $R_4 = 300$

Выполнение полного факторного эксперимента позволило построить регрессионную модель, определяющую зависимость показателя β от коэффициентов R_1 , R_2 , R_3 и R_4 . На рисунке 4 представлена матрица планирования полного факторного эксперимента.

На основе предварительных исследований в качестве основных уровней варьируемых параметров были выбраны следующие значения коэффициентов R и интервалы варьирования I :

$$R_{10} = 460, R_{20} = 1400, R_{30} = 120, R_{40} = 300,$$

$$I_1 = 70, I_2 = 210, I_3 = 20, I_4 = 45.$$

№ опыта	R*0	R*1	R*2	R*3	R*4	R*1xR*2	R*1xR*3	R*1xR*4	R*2xR*3	R*2xR*4	R*3xR*4	R*1xR*2xR*3	R*1xR*2xR*4	R*2xR*3xR*4	R*1xR*2xR*3xR*4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
3	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
4	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
5	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
6	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1
7	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1
8	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1
9	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1
10	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
11	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
12	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1
13	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
14	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
15	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1

Рис. 4. Матрица планирования эксперимента для построения зависимости показателя β от коэффициентов R_1 , R_2 , R_3 и R_4

Матрица планирования заполнена кодированными значениями варьируемых параметров, которые соответствуют верхним и нижним уровням параметров. Кодированные значения параметров рассчитываются по следующей формуле:

$$R^*_j = (R_j - R_{j0})/I_j.$$

В результате проведения полного факторного эксперимента, который для четырех варьируемых параметров включает 16 испытаний, были получены значения показателя β для различных сочетаний значений коэффициентов R_1 , R_2 , R_3 и R_4 .

На основании этих данных были рассчитаны коэффициенты b_{ij} регрессионной модели, определяющей зависимость показателя β от коэффициентов R_1 , R_2 , R_3 и R_4 .

Коэффициенты b_{ij} рассчитывались по следующей формуле:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{ij}^* \beta_i}{N},$$

где N – количество испытаний.

В результате получилась следующая регрессионная модель зависимости показателя β от варьируемых параметров:

$$\begin{aligned} \beta = & b_0 + b_1 R^*_1 + b_2 R^*_2 + b_3 R^*_3 + b_4 R^*_4 + b_{12} R^*_1 R^*_2 + \\ & + b_{13} R^*_1 R^*_3 + b_{14} R^*_1 R^*_4 + b_{24} R^*_2 R^*_4 + b_{34} R^*_3 R^*_4 + b_{123} R^*_1 R^*_2 R^*_3 + \\ & + b_{124} R^*_1 R^*_2 R^*_4 + b_{234} R^*_2 R^*_3 R^*_4 + b_{1234} R^*_1 R^*_2 R^*_3 R^*_4. \end{aligned}$$

Анализ коэффициентов b_{ij} показал, что значимыми являются только коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 и b_{12} , что позволило упростить регрессионную модель и привести ее к следующему виду:

$$\beta = 0,8022 - 0,0068R_1^* + 0,00073R_2^* + 0,0021R_1^*R_2^*.$$

После проверки адекватности построенной модели в выбранной области варьирования параметров было отмечено следующее:

- значения коэффициентов R_3 и R_4 не оказывают существенного влияния на показатель β при данных условиях постановки задачи;
- значимость коэффициентов b_1 и b_2 указывает на то, что коэффициенты R_1 и R_2 оказывают существенное влияние на целевой показатель β ;
- существенное влияние на показатель β также оказывает смешанный фактор, учитывающий одновременное изменение коэффициентов R_1 и R_2 . Об этом свидетельствует относительно большое значение коэффициента b_{12} по сравнению с коэффициентами b_1 и b_2 ;
- по сравнению с коэффициентом b_0 коэффициенты b_1 , b_2 и b_{12} относительно малы. Это свидетельствует о том, что выбранные основные уровни коэффициентов R_1 и R_2 находятся вблизи оптимальных значений;
- коэффициент b_1 получился отрицательным, а коэффициенты b_2 и b_{12} положительными. То есть для уменьшения целевого параметра коэффициент R_1 следует увеличивать, а коэффициент R_2 – уменьшать.

Поиск оптимальных значений коэффициентов R_1 и R_2 с помощью построенной регрессионной модели привел к одной из границ области варьируемых параметров:

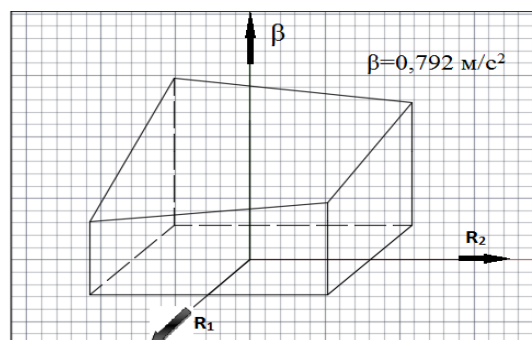


Рис. 5. Область значений показателя β

Этой точке соответствуют следующие значения коэффициентов R :

$$R_1 = 530, R_2 = 1190, R_3 = 120, R_4 = 300.$$

График зависимости ускорения поддрессоренной массы для этих параметров амортизатора показан на рис. 3 (кривая 4, значение показателя β равно 0,792).

Проверка адекватности регрессионной модели с целью ее экстраполяции за пределы границ области варьируемых параметров не дала положительных результатов. Поэтому было принято решение выбрать новый основной уровень и выполнить полный факторный эксперимент с учетом результатов, полученных ранее. Так как влияние коэффициентов R_3 и R_4 на значение целевого показателя оказалось несущественным, варьировались только значения коэффициентов R_1 и R_2 . По результатам этого эксперимента были получены уточненные значения коэффициентов R_1 и R_2 . График зависимости ускорения поддрессоренной массы для этих параметров амортизатора показан на рис. 3 (кривая 5, значение показателя β равно 0,788).

На основании результатов проведенных исследований была построена оптимизированная характеристика амортизатора:

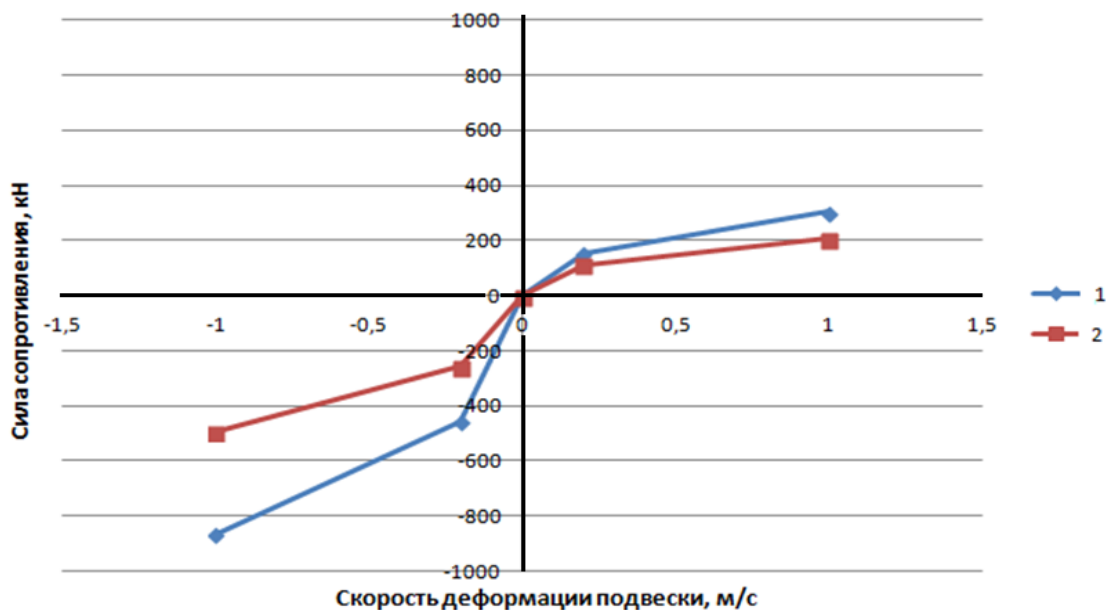


Рис. 6. Характеристика амортизатора:

1 – исходная характеристика, 2 – оптимизированная характеристика

Список литературы

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений. М.: Наука, 1976. 277 с.
2. Динамика системы «дорога – шина – автомобиль – водитель» / под ред. А.А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. 536 с.
3. Борисов С.В., Архипов А.И., Осипов В.И. Подвеска автомобиля: учеб. пособие. Ч. I. М.: МАДИ, 1995.

References

1. Adler Ju.P., Markova E.V., Granovskij Ju.V. *Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh reshenij* (The design of experiments in search for optimal solutions), Moscow, Nauka, 1976, 277 p.
2. *Dinamika sistemy "doroga – shina – avtomobil' – voditel"* (The dynamics of the system "road – tire – vehicle – driver"), Moscow, Mashinostroenie, 1976, 536 p.
3. Borisov S.V., Arhipov A.I., Osipov V.I. *Podveska avtomobilja* (Vehicle suspension), Moscow, MADI, 1995.