

**ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

*Докт. техн. наук РЕЙЗИНА Г. Н.¹⁾, докт. техн. наук, проф. КОРОБКО Е. В.²⁾,
канд. техн. наук, доц. ВОРОНОВИЧ Г. К.¹⁾*

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

E-mail: greizina@gmail.com

**INVESTIGATIONS ON ELASTIC AND DAMPING CHARACTERISTICS
OF VIBRATION ISOLATION SYSTEMS WHILE USING FACTOR EXPERIMENT**

REYSINA G. N.¹⁾, KOROBKO E. V.²⁾, VORONOVICH G. K.¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University,

²⁾A. V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

Представлены результаты исследований упругодемпфирующих характеристик виброзащитной системы. Получены адекватные математические модели относительных среднеквадратических величин ускорений виброзащитной массы в зависимости от упругой и вязкой составляющих. Показано, что предложенный метод множественной корреляции является наиболее рациональным для анализа рабочих жидкостей, применяемых в электрореологических демпферах.

Ключевые слова: упругодемпфирующие характеристики, виброзащитная система, факторы, адекватность модели, электрореологические характеристики.

Ил. 2. Табл. 3. Библиогр.: 7 назв.

The paper presents results of the investigations on elastic and damping characteristics of a vibration isolation system. Adequate mathematical models of relative root-mean-square values for acceleration of anti-vibration mass have been obtained depending on elastic and viscous constituents. The paper reveals that the proposed method of multiple correlation is the most rational one for the analysis of power fluids used in the electro-rheological dampers.

Keywords: elastic and damping characteristics, vibration isolation system, factors, model adequacy, electro-rheological characteristics.

Fig. 2. Tab. 3. Ref.: 7 titles.

Актуальность разработки эффективных средств виброзащиты от воздействия низких частот как в системах поддрессоривания транспортнх средств, так и в приборах точной механики обусловлена наличием весьма значительных объемов экспериментального материала, описывающего связи упругодемпфирующих характеристик в демпферах [1–3]. В то же время быстрое получение информации, интересующей исследователя в работе с упругодемпфирующим материалом (жидкость, порошки и др.), весьма затруднительно вследствие большого объема информации.

Эффективным методом получения информации для конкретных условий производства и технологии является создание (генерация) математических модулей определения свойств интеллектуальных упругодемпфирующих систем. Как известно [4, 5], в зависимости от уровня (глубины, подробности) проникновения исследователя в природу происходящих в системе процессов их модели в первом приближении могут быть подразделены на макро- и микро-модели [6, 7].

Одним из примеров математической микро-модели является метод расчета диаграмм по

упругодемпфирующим данным. В качестве оптимального метода создания макромоделей виброзащитных систем авторами предложен метод множественной корреляции.

Метод множественной корреляции пока не нашел широкого применения в системах виброзащиты при использовании интеллектуальных материалов вследствие сложности и громоздкости алгоритма. Между тем зависимость свойств упругодемпфирующих характеристик от влияния одновременно множества факторов для виброзащиты не исключение.

На практике часто возникают две ситуации.

1. Разработать количественную структуру упругодемпфирующего материала, гарантирующего получение оптимальных свойств виброзащитной системы, в частности минимум среднеквадратической величины ускорения. Наиболее быстрый способ решения данной задачи – математическое планирование эксперимента с последующей оптимизацией.

2. Структура известна, например зависимость вязкой составляющей силы сопротивления, упругой составляющей от поля. Необходи-

мо определить ускорение виброзащитной системы для эффективного гашения колебаний в динамических условиях.

Авторами предложена инженерная методика определения влияния упругодемпфирующих характеристик на вибрационную мощность на основе многофакторного анализа, структурная схема которого изображена на рис. 1.

Расчет режимов управления процессом диссипации энергии, обеспечивающей достижение наилучшего сочетания используемых упругодемпфирующих характеристик материала с целью эффективного гашения колебаний, основан на реализации полного факторного эксперимента 2^3 с учетом возможных взаимодействий факторов. В качестве переменных факторов выбраны значения: масса (z_1), упругость (z_2), вязкость (z_3). Основой для выбора уровней и интервалов варьирования значений факторов (табл. 1) служили результаты исследования, определенные из априорной и экспериментальной информации [4]. Всего было выполнено восемь виртуальных опытов.

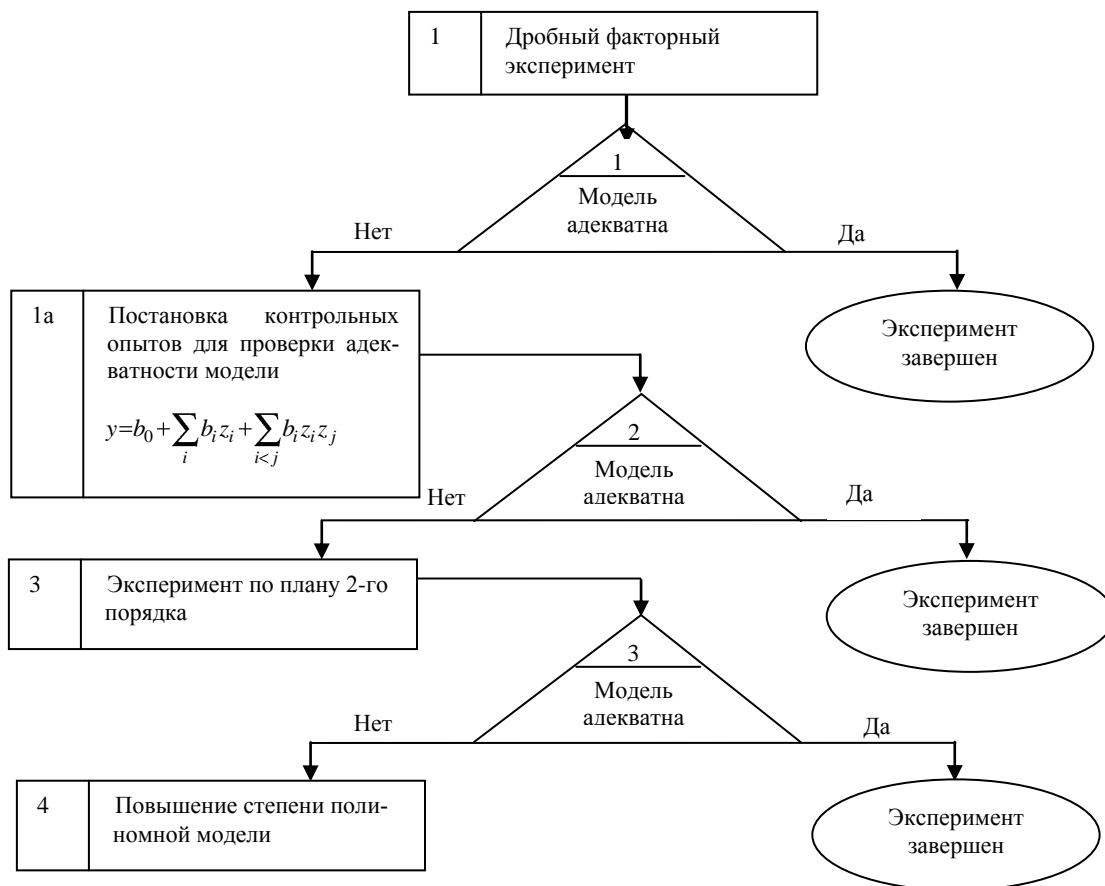


Рис. 1. Структурная схема математического эксперимента

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровень, интервал	Фактор					
	1-й		2-й		3-й	
	z_1	Z_1	z_2	Z_2	z_3	Z_3
Основной уровень	z_{10}	0	z_{20}	0	z_{30}	0
Интервал варьирования	Δz_1	1	Δz_2	1	Δz_3	1
Верхний уровень	z_{1max}	+1	z_{2max}	+1	z_{3max}	+1
Нижний уровень	z_{1min}	-1	z_{2min}	-1	z_{3min}	-1
Формулы перевода натуральных значений факторов z_j в нормированные Z_j и обратно	$Z_2 = \frac{z_2 - z_{20}}{\Delta z_2}; \quad z_2 = z_{20} + \Delta z_2 Z_2;$ $z_{20} = \frac{z_{2max} - z_{2min}}{2}; \quad \Delta z_2 = \frac{z_{2max} - z_{2min}}{2}$					

При выборе факторов z_i учитывали предъявляемые к ним требования: управляемость, т. е. возможность поддержания их на определенном уровне; однозначность и непосредственное их воздействие на поддресоренный объект исследования. Определение уровней интервалов варьирования факторов представлено в табл. 1.

Математическая модель взаимосвязи факторов с учетом задания ориентировочных пределов их изменения и требований совместимости имеет вид

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i z_i + \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq j}}^n b_{ij} z_i z_j. \quad (1)$$

Адекватное описание функции отклика (1) в заданной части факторного пространства, уровни и интервалы варьирования представлены в табл. 2. Исследования проведены для сиденья трактора «Беларус» с использованием полного факторного эксперимента 2^3 , рабочая матрица которого приведена в табл. 2.

Авторами разработана программа, реализующая математическое планирование эксперимента. Входными параметрами в программе являлись: масса, упругость, вязкость (коэффициент демпфирования) и возмущение; они же представлены в программе как независимые переменные и обозначены соответственно: z_1, z_2, z_3, z_4 . Выходными являются полная сумма квадратов, остаточная сумма квадратов, сумма регрессии, среднее квадратическое отклонение, коэффициент множественной корреляции, критерий Фишера (расчетный и теоретический), которые определяют адекватность модели.

В результате получены адекватные математические модели (полиномиальные зависимости), позволяющие проанализировать колебательную систему с пассивной подвеской

$$y = 4,1 + 1,243z_1 - 0,04z_2 + 0,13z_3 - 0,001z_1 z_2 - 0,0192z_2 z_3, \quad (2)$$

где y – среднеквадратическое ускорение на сиденье.

Таблица 2

Рабочая матрица полного факторного эксперимента 2^3

Интервал варьирования и уровень факторов	Масса, кг	Упругость, (Н/м) · 10 ⁴	Вязкость, кг/с	Ускорение на сидении, м/с ²
Нулевой уровень	65	2,4	110	1,25
Интервал варьирования	15	0,4	30	0,25
Нижний уровень $x_i = -1$	50	2,0	80	1,00
Верхний уровень $x_i = +1$	80	2,8	140	1,50
	z_1	z_2	z_3	y
Опыты:				
1	-	-	-	1,05
2	+	-	-	1,10
3	-	+	-	1,12
4	+	+	-	1,02
5	-	-	+	1,18
6	+	-	+	1,24
7	-	+	+	1,25
8	+	+	+	1,20

Для рабочих жидкостей, применяемых в устройствах электрореологического демпфирования, изменения вязкой составляющей $F(az + bz)$ от напряженности электрического поля с использованием данных эксперимента (табл. 3) имеют вид:

$$a = 30609 + 6490 \ln|E|; \quad (3)$$

$$b = -414 \cdot 0,4E^2 + 302,25E + 86,67. \quad (4)$$

Таблица 3

Напряженность E , кВ/мм	Упругость, (Н/м)·10 ⁴	Вязкость, кг/с
0,02	0,5	90
0,20	2,1	135
0,30	2,2	143
0,40	2,5	137
0,60	2,8	117
0,80	2,8	65

С учетом (3) и (4) получена адекватная математическая модель зависимости ускорения от упругости и вязкости

$$y = 0,84 - 6,4 \cdot 10^{-6} \cdot z_2 - 3,35 \cdot 10^{-3} \cdot z_3 + 2,91 \cdot 10^{-8} \cdot z_3 z_2. \quad (5)$$

Результаты численного расчета представлены в виде факторного пространства на рис. 2.

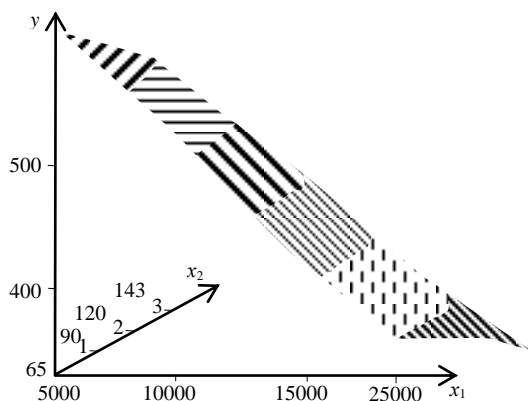


Рис. 2. Поверхность отклика численного расчета (5) в зависимости от напряженности электрического поля

ВЫВОДЫ

1. Оценка упругодемпфирующих характеристик при исследовании колебаний виброзащитных систем может быть выполнена на основе полного факторного эксперимента.
2. Рабочие жидкости, применяемые в устройствах электрореологического демпфера, обеспечивают эффективное гашение колебаний в динамических условиях за счет прироста вязкости под действием электрического поля.

3. Для обеспечения стабильных показателей виброизоляции при изменении внешних условий необходимо высокое быстродействие контура адаптации, выполненного на основе электрореологических демпфирующих устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рейзина, Г. Н.** К синтезу систем подрессоривания многоопорных машин / Г. Н. Рейзина // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 9. – С. 103–107.
2. **Рейзина, Г. Н.** Построение многофакторной математической модели при наличии ограничений / Г. Н. Рейзина // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77, № 4. – С. 168–169.
3. **Vibration Control of an ER Seat Suspension for a Commercial Vehicle / S. B. Choi [et al.] // J. of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 2003. – Vol. 125. – P. 60–68.**
4. **Шульман, З. П.** Системы виброзащиты на основе демпферов вязкого трения с электрореологической сущностью / З. П. Шульман, Б. М. Хусид, Е. В. Коробко // ДАИ АН БССР. – 1987. – Т. 31, № 8. – С. 117–120.
5. **Исследование характеристик ЭР-демпфера вязкого трения в системе виброизоляции точной аппаратуры / З. П. Шульман [и др.] // ИФЖ. – 1987. – Т. 52, № 2. – С. 237–244.**
6. **Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивоботенко [и др.]. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.**
7. **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Марков, Д. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

REFERENCES

1. **Reysina, G. N.** To Synthesis of Springing Systems of Multiply Supported Machinery / G. N. Reysina // Avtomobilnaya Promyshlennostj (Automotive Industry). – 2004. – No 9. – P. 103–107.
2. **Reysina, G. N.** Development of Multi-Factor Mathematical Model Under Constraints / G. N. Reysina // Inzhenerno-Fizichesky Zhurnal (IFZh) (Engineering and Physics Journal – EPJ). – 2004. – Vol. 77, No 4. – P. 168–169.
3. **Vibration Control of an ER Seat Suspension for a Commercial Vehicle / S. B. Choi [et al.] // J. of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 2003. – Vol. 125. – P. 60–68.**
4. **Shulman, Z. P.** Vibration Protection Systems on the Basis of Viscous Friction Dampers with Electro-Rheological Suspension / Z. P. Shulman, B. M. Khusid, E. V. Korobko // DAI (State Optical Institute) AS BSSR. – 1987. – Vol. 31, No 8. – P. 117–120.
5. **Investigations on Characteristics of Viscous Friction ER-Damper in the Vibration Isolation System of Accurate Equipment / Z. P. Shulman [et al.] // Inzhenerno-Fizichesky Zhurnal (IFZh) (Engineering and Physics Journal – EPJ). – 1987. – Vol. 52, No 2. – P. 237–244.**
6. **Planning of Experiment in Electro-Mechanics / B. A. Ivobotenko [et al.]. – М.: Energia (Energy), 1975. – 184 p.**
7. **Adler, Yu. P.** Planning of Experiment while Searching for Optimum Conditions / Yu. P. Adler, E. V. Markov, D. V. Granovsky. – М.: Nauka (Science), 1976. – 279 p.

Поступила 16.07.2013