

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ДЕМПФЕРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Проничев Ю.Н., Пономарев Ю.К., Чегодаев Д.Е.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара.

Математические модели гистерезиса, подтвержденные экспериментальными данными, являются той необходимой совокупностью, которая открывает перспективы широкого применения рассматриваемого типа демпферов, дает возможность оптимизации их параметров, позволяет надеяться на снижение вибронпряженности двигателя и его составных частей при уменьшении веса. Созданием математических моделей многослойных гофрированных демпферов естественных ДЛА и их исследованием в разные годы занимались многие ученые: В.П. Иванов, В.Б. Маринин, А.И. Сойфер, И.Д. Эскин, А.И. Иващенко, П.Д. Вильнер, В.А. Антипов, Л.П. Покрасс, А.И. Рейзер, Н.С. Кондрашов, авторы настоящей статьи (см. библиогр. в [1]).

В результате многолетней работы математические модели гофрированных демпферов при их одноосном нагружении стали достаточно хорошо согласовываться с экспериментом по форме гистерезиса, по зависимостям жесткости и коэффициента поглощения от амплитуды. При распространении известных гипотез и упрощений [1, стр. 200...214] на случай круговых движений вибратора было оказано, что жесткость демпфера уже нельзя представлять в традиционном виде отношения силы сопротивления к смещению вибратора, в силу отсутствия в математике операции деления векторов. Пришлось прибегнуть к замене векторов сил и перемещений на их комплексные аналоги и к операции деления комплексных величин для определения комплексной жесткости демпферов.

Исследование, проведенное в [1], показало, что петли гистерезиса при круговых орбитах движения вибратора имеют вид эллипсов, что подтвердилось в эксперименте, однако по параметру комплексной жесткости получилось большое качественное расхождение с экспериментом. При осмыслении этого факта высказывались гипотезы о некачественном проведении эксперимента и недочетах в математической модели демпфера.

Отработка обеих гипотез привела к следующему. Эксперимент был признан качественным, однако при повторных обмерах геометрии гофрированных демпферов было выяснено, что высоты гофров в ненагруженном состоянии имеют небольшие (не превышающие $\pm 5\%$) отклонения от номинального значения, указанного в чертеже. При теоретических исследованиях данный параметр выбирался равным номинальному, а разброс в пределах допуска игнорировался. Предполагалось, что этот разброс должен как-то взаимно компенсировать друг друга в единой системе. Кроме того, было известно, что приспособление для термофиксации гофров изготавливается очень точно на станках с программным управлением и форма профиля всех волн гофров практически идентична. Оказалось, что это не так. Кроме того, в гофрированном демпфере имеется разрез под шпоночный паз, который в математической модели не учитывался, хотя и было известно [2], что это вносит небольшую погрешность в результат. Не учитывалась и некоторая, весьма малая, эллипсность расточки корпуса опоры, что также могло привести к рассогласованию теории и эксперимента.

В новой математической модели гофрированного многослойного демпфера за основу взяты соотношения и гипотезы [1] с добавлением следующего: при наличии шпоночного паза 1-й и m -й гофр имеют нагрузки в соответствии с графиком, приведенным на рис.3.21 в [1]; все высоты гофров в ненагруженном состоянии имеют разные величины, определяемые номинальным значением по чертежу и случайным значением в пределах допуска на этот параметр; силы трения гофров с вибратором T_i определяются по формуле, реализующей идею А.В. Верховского [4], и разработанную в работе [1]:

$$T_i = f \cdot N_i \cdot \text{sign}(\dot{s}_i) \cdot [1 - 2 \cdot \exp\{-k \cdot |s_i + s_{oi} \cdot \text{sign}(\dot{s}_i)|\}], \quad (1)$$

где f – коэффициент трения на i – той вершине гофра, N_i – нормальная сила сопротивления на i – том гофре, s_i – тангенциальное смещение вибратора в контакте с i – тым гофром, s_{oi} – амплитуда тангенциального смещения, \dot{s}_i – скорость тангенциального смещения вибратора

$$\dot{s}_i = \frac{ds_i}{dt}, \quad (2)$$

а k – коэффициент, определяющий ширину зоны “предварительного смещения” [1].

С помощью данной математической модели был проведен “машинный” эксперимент, позволивший прояснить ряд неизвестных

ные свойств многослойных гофрированных демпферов, в основе которых лежит разброс геометрии гофров. Программа расчета была задана в системе "Mathcad 6.0 Plus" [3]. Параметры, используемые при проведении "машинного" эксперимента, приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

№ рис.	m	n	b, мм	h, мм	E, кН/мм ²	f
1...4	8	22	36	0,39	196	0,15
5...8	8	22	36	0,39	196	0,15
9, 10	8	22	36	0,39	196	0,15

продолжение табл. 1.

№ рис.	δ, мм	h*, мм	D, мм	k	A, мм
1...4	0,25	1,1	102	30	0,24
5...8	0,25	1,1±0,1	102	30	0,24
9, 10	0,2	1,1±0,1	102	30	var

Таблица 2.

i	1	2	3	4
h _i *, мм	1,000	1,039	1,117	1,070

продолжение табл. 2.

i	5	6	7	8
h _i *, мм	1,165	1,035	1,142	1,061

На рис. 1 показана зависимость комплексной жесткости демпфера C^* , подсчитываемой по формуле:

$$C^* = \frac{P_y}{A} + i \cdot \frac{P_d}{A} = \text{Re}(C^*) + i \cdot \text{Im}(C^*), \quad (3)$$

где P_y и P_d - соответственно, упругая и демпфирующая составляющие одной силы сопротивления демпфера P , A - радиус круговой траектории движения вибратора. Вид этого графика весьма коварен. При автоматическом построении этого графика не сразу удалось становить, что на самом деле на нем уложено восемь идентичных кратных числу пролетов m) траекторий. Момент сопротивления рецессии

$$M_{cn} = P_d \cdot A \quad (4)$$

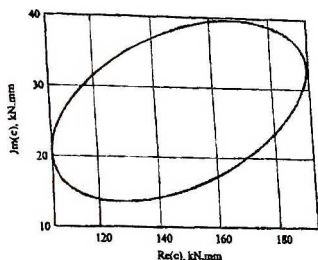


Рис. 1. Жесткость демфера с параметрами, приведенными в табл.1. Высоты гофров приняты одинаковыми

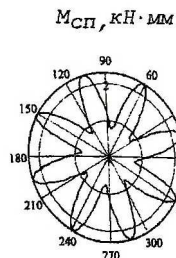


Рис. 2. Зависимость момента сопротивления прецессии от углового положения вектора смещения вибратора $h^*=1, l=const$.

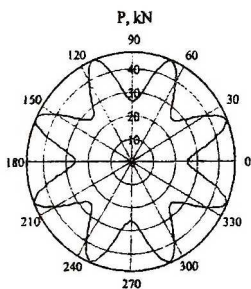


Рис. 3. Зависимость силы сопротивления демфера от углового положения вектора смещения вибратора ($h^*=1, l=const$).

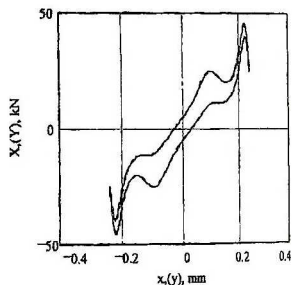


Рис. 4. Упругогистерезисные петли демфера (в данном случае они совпали) ($h^*=1, l=const$).

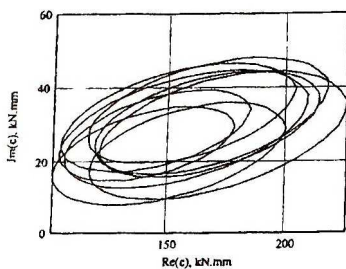


Рис.5. Жесткость демфера с параметрами, приведенными в табл. 1. Высоты гофров распределены случайным образом в пределах $1,1 \pm 0,1$ мм.

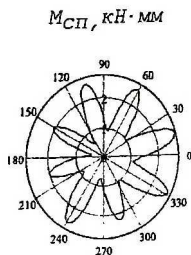


Рис. 6. Зависимость момента сопротивления прецессии от углового положения вектора смещения вибратора $h^*=1, l \pm 0,1$ мм.

еет вид цветка с числом лепестков, кратных m (рис. 2). При этом все тетки одинаковы по форме, но повернуты относительно осей симметрии демпфера на некоторый угол, зависящий от амплитуды A . Логичный вид имеет зависимость полной силы сопротивления демпфера P от углового положения вектора A (рис. 3).

Петли гистерезиса в диапазоне $0 < A \leq 0,85 \delta$ имеют вид эллипсов, при $0,85 \delta \leq A \leq \delta$ несколько изменяют свою форму в виду льшой нелинейности гофров (рис. 4).

Все характеристики вкоре изменяются при внесении больших отклонений в величины высот гофров h_i^* , указанном в блицах 1 и 2, комплексная жесткость демпфера C^* за цикл нагружения $0 \leq \alpha \leq 360^\circ$ приобретает вид хаотически расположенных ивых, имеющих различные очертания в зависимости от величины A . ример, при $A = 0,24$ ($A/\delta = 0,96$) комплексная жесткость имеет д, показанный на рис. 5. При этом $M_{сн}(\alpha)$ и $P(\alpha)$ имеют вид цветков с оизвольно деформированными лепестками (рис. 6, 7), петли стерезиса в проекциях на оси координат x и y (X - и Y - гистерезисы) и фиксированной амплитуде A незначительно отличаются друг от уга (рис. 8).

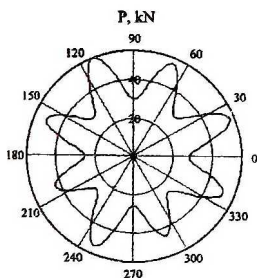


Рис. 7. Зависимость силы сопротивления демпфера от углового положения вектора смещения амплитуды ($h^*=1,1 \pm 0,1$ мм).

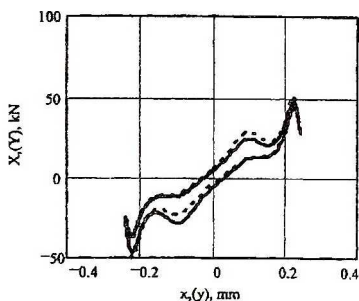


Рис. 8. Упругогистерезисные петли демпфера: — X -гистерезис; --- Y -гистерезис; ($h^*=1,1 \pm 0,1$ мм).

На рис. 9 показан математический эксперимент в виде оследовательности кадров с траекториями комплексной жесткости C^* ля различных амплитуд A . Нечто подобное приведенному на рис.9 авторы получили впервые в 1991 году при проведении натурального ксперимента [1]. В те же времена авторы полагали, что никакой математической моделью подобное описать невозможно. В ействительности все оказалось именно так, как показывал ксперимент. Небольшое усложнение математической модели и точное

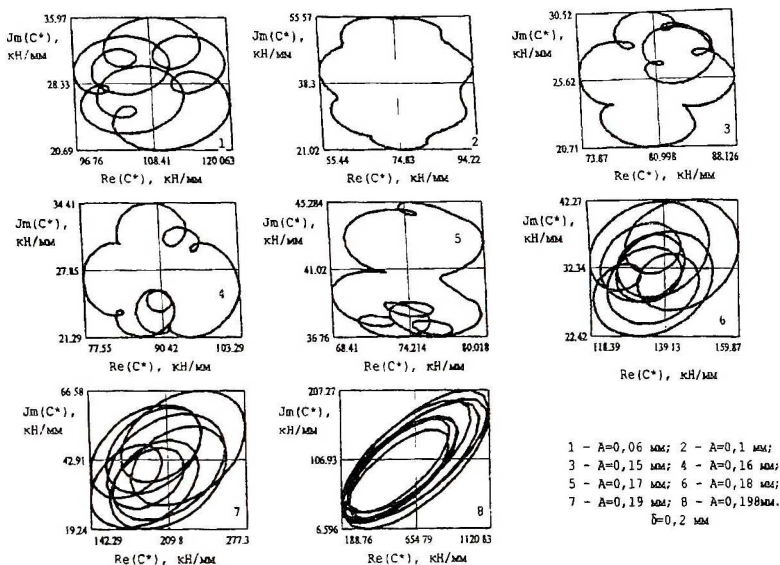


Рис.9. Эволюция траекторий комплексной жесткости демпфера при изменении амплитуды А

задание геометрии демпфера обеспечивает адекватное поведение теории. На рис. 10 показана эволюция момента сопротивления прецессии $M_{сп}(\alpha, A)$ демпфера с теми же параметрами, что и рис. 9.

В заключении отметим, что в серийном производстве параметр комплексной жесткости упругодемпферных опор можно использовать в качестве рассматриваемой системы конструкционного демпфирования.

величины, характеризующей качество изготовления. Так если разброс параметров высот гофров по окружности минимален, то минимальным будет и "расщепление" годографа жесткости. В качестве количественного параметра, определяющего трудноизмеряемый разброс высот гофров можно взять длину годографа комплексной жесткости, определяемую в виде

$$L_c = \sum_{i=1}^{m_1} \sqrt{[\text{Re}(C^*)_{i+1} - \text{Re}(C^*)_i]^2 + [Jm(C^*)_{i+1} - Jm(C^*)_i]^2}. \quad (5)$$

Назначив "коридор" этому параметру, можно принимать решения по отбраковке некачественно изготовленных пакетов демпферов.

В работе показано (рис.11), что существует взаимно однозначное соответствие между длиной годографа L_c , амплитудой А

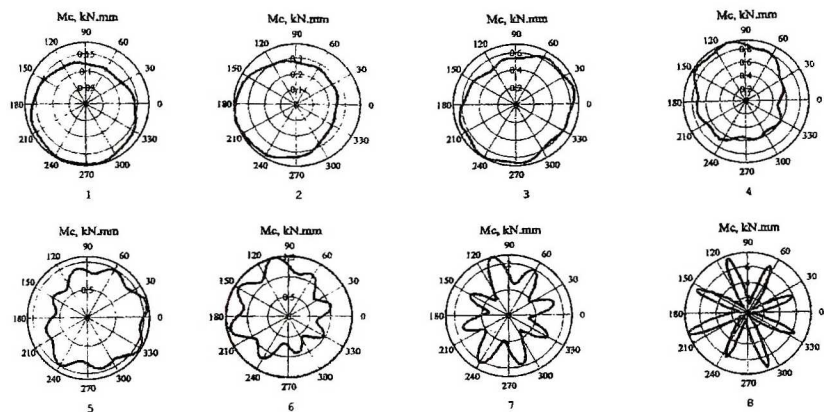


Рис.10. Эволюция годографов момента сопротивления прецессии при изменении амплитуды (радиуса) траектории движения вибратора А

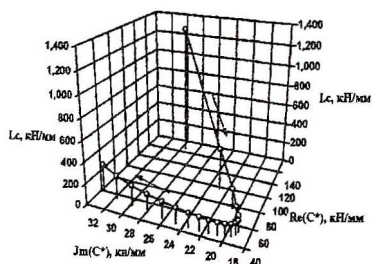


Рис. 11. Зависимость длины годографа C^* от расположения точки в процессе нагружения вибратора.

вибратора и разбросом высот гофров по окружности опоры. Это обстоятельство дает возможность по параметру L_c с большой точностью определять размах разброса высот гофров для заданной (известной) амплитуды движения вибратора.

Список литературы

1. Чегодаев Д.Е., Пономарев Ю.К. Демпфирование. Самара: Изд-во СГАУ, 1997. 134 с.
2. Пономарев Ю.К. Разработка и исследование многослойных демпферов двигателей летательных аппаратов. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук., Куйбышев, 1976.-232 с.
3. Mathcad 6.0 Plus. Финансовые и научные расчеты в среде Windows 95./Перевод с англ. - М.: Информационно-издательский дом "Филинь", 1996. - 712 с.
4. Верховский А.В. Явление предварительного смещения при трогании несмазанных поверхностей с места. Журнал прикладной физики, № 3, 1926.