

УДК 621.431.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВТОРЯЕМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ДЕМПФЕРОВ АВИАЦИОННЫХ И РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

© 2015 Ю. К. Пономарёв

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Целью работы является исследование повторяемости упругодемпфирующих свойств многослойных гофрированных опор авиационных и ракетных двигателей в условиях неточного изготовления деталей в серийном производстве. Исследование выполнено расчётным методом Монте-Карло с использованием экспериментально подтверждённых законов распределения допусков на изготовление деталей, входящих в конструкцию опор. Созданы математическая модель виртуального серийного производства опор с многослойными гофрированными демпферами, математическая модель одноосного статического нагружения опоры и на их основе – модель разброса упругогистерезисных характеристик. Исследованы поля разброса характеристик опор при разных параметрах точности изготовления деталей, влияющих на вышеуказанные характеристики. Выяснено, что статистические законы распределения упругофрикционных характеристик многослойных демпферов в опорах не подчиняются нормальному закону. Наиболее вероятные значения этих характеристик на 20-30% меньше среднеарифметических, подсчитанных для всего объёма выборки. Расчёты показали, что при сложившейся в производстве практике сочетания допусков на изготовление деталей демпферов в серийном производстве разброс их характеристик довольно значителен, что приводит к необходимости селективного подбора некоторых деталей из серии.

Двигатели летательных аппаратов, конструкционное демпфирование, многослойные опоры, рассеяние энергии, гистерезис, жёсткость опор, виброзащита, стабильность характеристик.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-354-364

Введение

Задача снижения вибраций авиационных и ракетных двигателей тесно связана с проблемой обеспечения повторяемости расчётных характеристик упругодемпфирующих опор при серийном производстве двигателей. На практике вследствие неточности изготовления деталей, образующих демпфирующее устройство, отклонений от технологии изготовления и сборки реальные характеристики демпфирующих опор могут существенно отличаться от расчётных.

Это обстоятельство совместно с разбросом остаточных дисбалансов роторов приводит к разбросу значений критических скоростей роторов и уровня вибраций турбомашин в серии. В случае близкого расположения расчётных критических скоростей к рабочим режимам увеличивается вероятность повышенных вибраций в рабочем диапазоне оборотов у отдельных турбомашин.

Таким образом, мало рассчитать (или подобрать) для данной турбомшины оптимальную настройку демпфера, необходимо ещё предусмотреть, чтобы эта настройка реализовывалась в опорах двигателей при их серийном производстве. Иначе весь труд по оптимизации демпфера может быть сведён к нулю.

В настоящей работе расчётным путем проанализирован разброс упругофрикционных характеристик (УФХ) многослойных гофрированных демпферов серийных турбомашин и предложена методика сокращения этого разброса на стадии проектирования.

УФХ многослойного гофрированного демпфера (рис.1) зависят от большого числа геометрических и физических параметров. Часть этих параметров в условиях серийного производства являются случайными величинами, изменяющимися в пределах полей допусков. Возникает вопрос: как влияют отклонения случайных параметров от номинальных значе-

ний на УФХ? Можно попытаться оценить пределы изменения УФХ демпфера, выбирая для каждого параметра «худшие» значения. Однако далеко не всегда известно, какой набор параметров будет «худшим». К тому же, если число параметров велико, такая оценка может оказаться сильно завышенной: на самом деле

маловероятно, чтобы все параметры одновременно оказались наихудшими.

Поэтому разумнее считать часть параметров демпфера и его УФХ случайными величинами и попытаться оценить их математические ожидания и соответствующие им дисперсии.

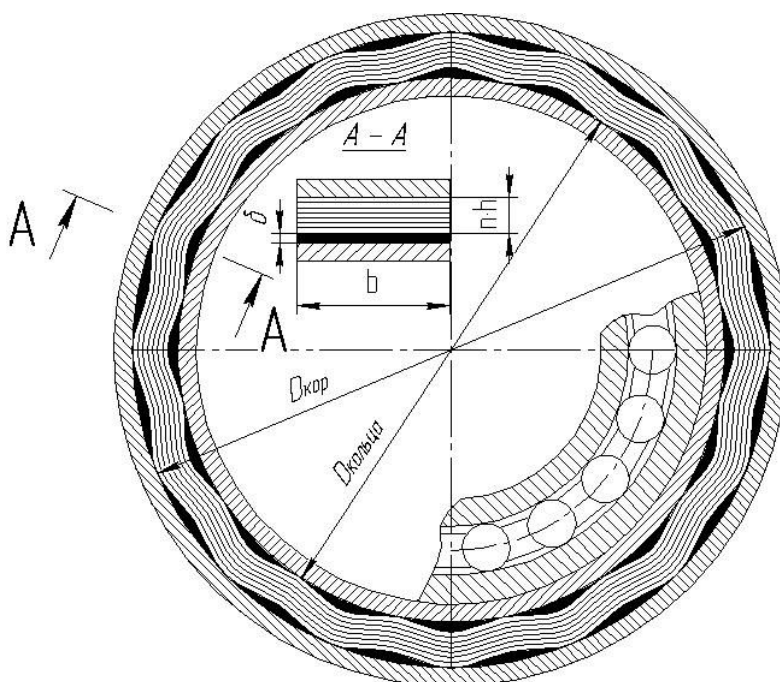


Рис. 1. Схема исследуемой опоры с многослойным гофрированным демпфером

Решить эту задачу аналитически для многослойного гофрированного демпфера практически невозможно ввиду сложности его математической модели. Можно изучить разброс характеристик экспериментально, исследовав большую партию готовых изделий. Однако экспериментальное исследование УФХ демпфера является чрезвычайно трудоёмким. К тому же это возможно далеко не всегда, например, на стадии проектирования.

Известен ещё один метод исследования, применяющийся в экономике [1], сейсмологии [2], статистике [3], в расчётах качества и надёжности изделий [4-5], материаловедении [6], энергетике [7], робототехнике [8], физике полимеров [9,10] – метод Монте-Карло [3]. Суть метода: с помощью ЭВМ разыгрываются случайные значения параметров, характеризующих

данное явление, и затем с помощью математической модели вычисляются значения искомой функции. Повторив опыты достаточное количество раз, по известным формулам можно определить математическое ожидание и дисперсию искомой функции. Таким образом, исследование разброса УФХ многослойных демпферов целесообразно осуществить расчётным путём с помощью метода Монте-Карло.

Постановка задачи

Для успешного применения метода Монте-Карло необходимо иметь:

- а) вероятностные характеристики распределения всех параметров, от которых зависят УФХ демпфера;
- б) математическую модель УФХ демпфера;

в) данные о допусках на все определяющие параметры.

Вероятностные характеристики распределения большинства геометрических параметров весьма точно подчиняются нормальному закону, что было выяснено на предварительном этапе исследований. Поэтому в настоящей работе в основном

использовался этот закон распределения случайных величин. Для одного из параметров был использован равномерный закон распределения. Математическая модель демпфера принята в виде, приведённом в работе [11]. Данные о номинальных параметрах и допусках приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров исследуемого демпфера и полей допусков на них

Наименование размера	Обозначение	Номинальная величина размера	Допуск
Диаметр корпуса, мм	$D_{кор}$	162,02	$\pm 0,02$
Число пластин в пакете	n	17	± 1
Толщина одной пластины, мм	h	0,39	$\pm 0,01$
Ширина пакета, мм	b	23,28	$\pm 0,26$
Высота гофров в свободном состоянии, мм	h^*	1,1	$\pm 0,1$
Средний шаг гофров, мм	t	31,8	—
Число пролётов	m	16	—
Угловой шаг гофров, град.	φ	$22^\circ 30'$	—
Радиальный зазор, мм	δ	0,125	$\pm 0,025$
Модуль упругости материала лент, Н/м ²	E	2·1011	—
Коэффициент трения гофров о вибратор	f	0,1	$\pm 0,02$
Диаметр кольца*, мм	$D_{кольца}$	145,74...146,55	$\pm 0,05$

* Истинный диаметр кольца подбирается селективно из комплекта 9 колец, изготавливаемых с шагом 0,1 мм, из условия обеспечения заданного радиального зазора $\delta = 0,125 \pm 0,05$.

На рис. 2 представлена укрупнённая блок-схема программы, разработанной для ЭВМ и моделирующей процесс серийного изготовления и испытания (циклического нагружения) многослойных гофрированных демпферов. Программа включает четыре основных блока:

- блок 1 – задание номинальных исходных данных (геометрических и физи-

ческих параметров демпфера) и допусков на эти данные;

- блок 2 – генерация случайных значений исходных данных в пределах полей допусков на них;

- блок 3 – математическая модель демпфера;

- блок 4 – вывод результатов, получаемых с помощью математической модели.

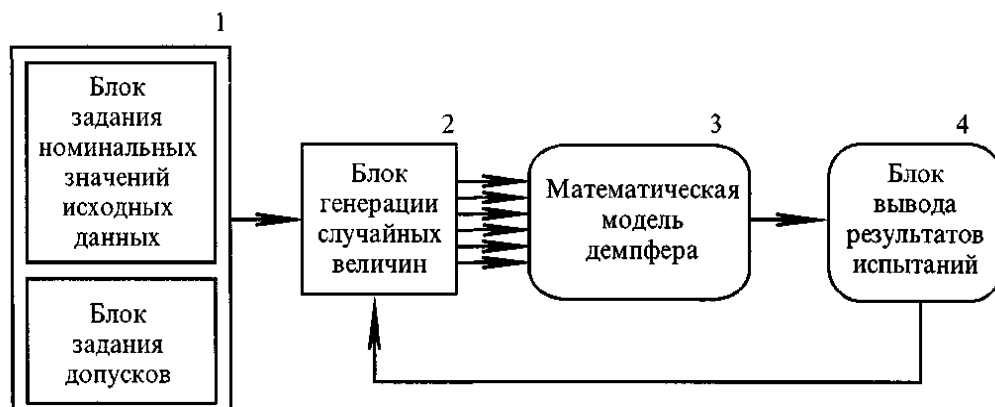


Рис. 2. Блок-схема моделирования серийного изготовления многослойных гофрированных демпферов

Часть исходных данных в блоке 1 (рис. 2) может задаваться точно. В этом случае они передаются в математическую модель без преобразований. К таким данным отнесено число пролётов демпфера m , модуль упругости E , шаг гофров t , угловое положение пролётов φ_i .

Остальные параметры (число пластин в гофрированном пакете n , коэффициент трения в контакте гофров с вибратором f , ширина пластин b , толщина одной пластины h , выгиб гофров в свободном состоянии h^* , радиальный зазор в собранном демпфере δ , поджатие гофров при сборке y_n) при выходе из блока 2 становятся случайными параметрами в пределах полей допусков на них. Сформированные таким образом исходные данные поступают на вход в математическую модель демпфера, выходом которой является совокупность случайных значений упруго-фрикционных характеристик. После вывода результатов управление передаётся на вход блока 2 и весь цикл расчётов повторяется.

Рассмотрим особенности алгоритма генератора случайных значений исходных данных. В программном обеспечении ЭВМ имеются специальные датчики псевдослучайных величин, которые вырабатывают последовательность случайных чисел с заданным законом распределения. Как правило, есть датчики с равномерным и нормальным законами распределения. Датчик случайных чисел с нормальным законом распределения вырабатывает числа из диапазона $(-\infty, +\infty)$ с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией, равной единице. Датчик случайных чисел с равномерным законом распределения вырабатывает числа из диапазона от нуля до единицы. Покажем, как с помощью этих датчиков организовано генерирование случайных значений исходных данных в пределах их полей допусков.

Анализ чертежей на изготовление демпферов показал, что любой геометрический размер можно представить в виде суммы его номинального значения $x_{ном}$ и

отклонения от последнего $\Delta\tilde{x}$, которое является случайным:

$$\tilde{x} = x_{ном} + \Delta\tilde{x}. \quad (1)$$

Для простоты примем, что отклонение $\Delta\tilde{x}$ расположено в диапазоне $-D \leq \Delta\tilde{x} \leq D$,

$$(2)$$

где D – допуск на размер. Исследование, проведённое автором по материалам паспортных данных на детали опор, показало, что при серийном производстве отклонения геометрических размеров от номинального значения подчинены нормальному закону распределения, если нет особых причин, нарушающих его. Обозначим величину безразмерного случайного числа, вырабатываемого датчиком случайных чисел, через \tilde{y} . Будем пользоваться в расчётах только теми числами, которые расположены в диапазоне

$$-3\sigma \leq \tilde{y} \leq +3\sigma. \quad (3)$$

Поскольку датчик случайных чисел генерирует числа с дисперсией $\sigma = 1$, то условие (3) преобразуется к виду

$$-3 \leq \tilde{y} \leq +3. \quad (4)$$

Введём некоторую промежуточную переменную \tilde{z} , связанную с \tilde{y} соотношением

$$\tilde{z} = \tilde{y}/3. \quad (5)$$

Тогда случайное отклонение $\Delta\tilde{x}$ можно представить в виде

$$\Delta\tilde{x} = \tilde{z}D. \quad (6)$$

Поскольку случайная величина \tilde{z} благодаря условиям (4) и (5) всегда меньше или равна единице, отклонение $\Delta\tilde{x}$ будет являться случайной величиной, значение которой не выходит за пределы поля допуска на эту величину.

Некоторые особенности имеет вопрос о генерировании случайного числа пластин в пакете n . Согласно чертежам на изготовление и сборку демпферов этот параметр может иметь вариацию в пределах ± 1 пластины:

$$n = n_{ном} \pm 1. \quad (7)$$

Опросы работников серийных заводов показали, что величина этого параметра, по-видимому, является безразлич-

ной для работников сборочного цеха: они стремятся обеспечить главным образом допустимую величину радиального зазора в демпфере. С этой точки зрения число пластин в пакете является второстепенным параметром. Поэтому в настоящей работе был принят равномерный закон распределения числа пластин в пакетах серийных демпфирующих опор.

Воспользовавшись соответствующим датчиком случайных чисел, можно смоделировать последовательность демпферов с числами пластин, подчиняющимися равномерному закону распределения. Для этого диапазон вырабатываемых датчиком случайных чисел (0 ... 1) был разбит на три интервала: (0...0,333), (0,333...0,666), (0,666... 1,0).

Если вырабатываемое датчиком число попадает в первый интервал, то числу пластин присваивается минимально допустимое число n_{\min} . Если случайное число попадает во второй интервал, то число пластин равно номинальному значению $n_{\text{ном}}$, в противном случае – максимально допустимому числу пластин n_{\max} .

Математически это можно выразить в виде:

$$n = \left\{ \begin{array}{l} n_{\min}, \text{ если } 0 \leq \tilde{y} < 0,333, \\ n_{\text{ном}}, \text{ если } 0,333 \leq \tilde{y} < 0,666, \\ n_{\max}, \text{ если } 0,666 \leq \tilde{y} \leq 1. \end{array} \right\} \quad (8)$$

Таким образом, с помощью двух датчиков, вырабатывающих случайные последовательности чисел, можно смоделировать случайное сочетание геометрических параметров демпферов, каждый из

которых подчиняется заданному (равномерному или нормальному) закону распределения. Аналогичным образом можно смоделировать случайные (в пределах полей допусков) значения параметров любого демпфирующего устройства и выявить повторяемость его УФХ в условиях серийного производства.

Результаты исследования

По разработанному алгоритму и программе, созданной на языке FORTRAN, проведено исследование повторяемости упругофрикционных характеристик серийных многослойных гофрированных демпферов, эксплуатирующихся на газотурбинных двигателях семейства "НК" [12], в турбонасосных агрегатах жидкостных ракетных двигателей РД-120 [13], на объектах народного хозяйства [14].

На рис. 3 в качестве примера приведены результаты расчётов рассеянной циклической энергии ΔW , подсчитанной у демпферов с различными сочетаниями параметров, распределённых по указанным законам. Расчёты проведены при относительной амплитуде смещения вибратора $\bar{A} = A/\delta = 0,45$. На рис. 4 и 5 показаны разбросы значений коэффициента поглощения ψ и зависимости среднециклической жёсткости C_{cp} от условного номера реализации демпфера в серийном производстве N , полученные для той же относительной амплитуды ($\bar{A} = 0,45$).

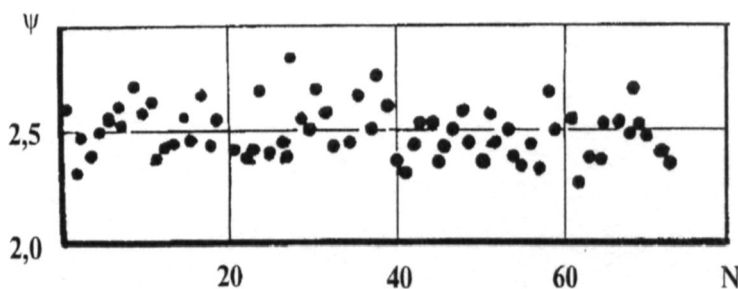


Рис. 3. Зависимость рассеянной за цикл энергии от условного номера реализации демпфера в серийном производстве

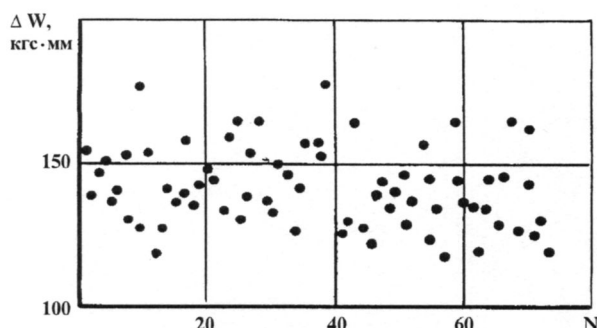


Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения от условного номера реализации демпфера в серийном производстве

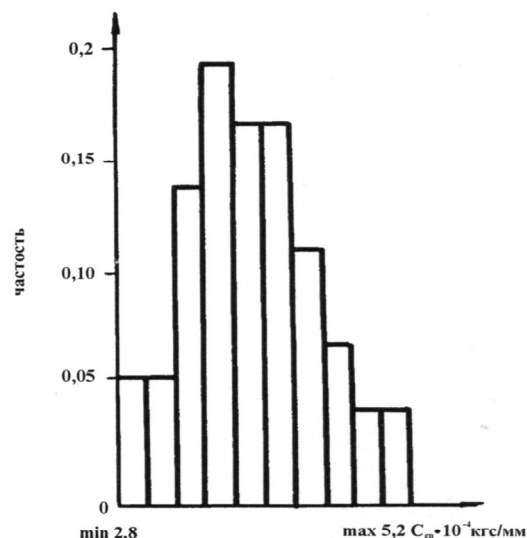


Рис. 5. Типичная диаграмма распределения среднециклической жёсткости опоры по диапазону разброса в серийном производстве

Для количественной оценки разброса УФХ в работе были использованы известные параметры:

1. Среднеарифметическое значение параметра

$$M_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i. \quad (9)$$

2. Абсолютный разброс параметра

$$\theta_x = X_{\max} - X_{\min}. \quad (10)$$

3. Относительный разброс параметра

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_x}{M_x}. \quad (11)$$

Расчёты показали, что при сложившемся сочетании допусков на изготовление деталей демпфера в серийном производстве разброс УФХ довольно значителен и составляет для среднециклической жёсткости C_{cp} 58-70 %; для циклической рассеянной энергии ΔW - 40-43 %; для коэффициента поглощения ψ - 14-28% (в зависимости от амплитуды). Выяснено также, что статистические законы распределения УФХ многослойных демпферов не подчиняются нормальному закону. Наиболее вероятные значения этих характеристик на 20-30% меньше среднеарифметических, подсчитанных для всего объёма выборки. На рис. 5 в качестве примера показано распределение среднецикли-

ческой жёсткости опоры по диапазону разброса.

Для сокращения разброса характеристик демпферов предлагается:

а) пересмотреть некоторые допуски на геометрические размеры демпфера. Так, например, допуск на ширину пакета b является, по нашему мнению, явно завышенным. Его можно без ущерба для производства уменьшить на 40...50 %. Допуски на высоту гофра в свободном состоянии h^* и на радиальный зазор δ также являются значительными (см. табл. 1), влияние же их на УФХ существенно;

б) ввести в рабочие чертежи демпферов операцию контроля конусности наружного диаметра внутреннего кольца, так как в настоящее время эта величина не контролируется. Поскольку конусность этой детали определяет величину радиального зазора, очевидно её значительное влияние на характеристики опор двигателя;

в) ввести в технологический процесс сборки демпферов операцию селективного подбора внутренних колец (из комплекта, включающего 10-20 штук) под заданные размеры пакета и корпуса опоры. При этом необходимо исходить из условия обеспечения заданных упругофрикционных характеристик опоры, а не значения радиального зазора, как в существ-

вующей практике. Реализовать такую сборку можно следующим образом:

- измерить в цехе фактические размеры опор, демпфирующих пакетов и комплекта внутренних колец демпфера;
- используя разработанную программу, рассчитать всё возможное число вариантов сборки демпфера с разными внутренними кольцами;
- выбрать варианты, имеющие наименьшие отклонения упругофрикционных характеристик от заданных.

Внедрение разработанных предложений в производство может значительно увеличить стабильность вибрационных

характеристик двигателей и их надёжность.

С целью отработки предлагаемой технологии селективного подбора демпферов в опоры серийных двигателей была создана программа, моделирующая этот процесс на ЭВМ. Блок-схема программы представлена на рис. 6. С помощью этой программы удалось доказать, что при наличии на поточной линии 5...10 собираемых двигателей, даже не изменяя допуски на основные размеры опор, за счёт целенаправленной селективной сборки удаётся сократить разброс УФХ до 7...10 % (рис.7).

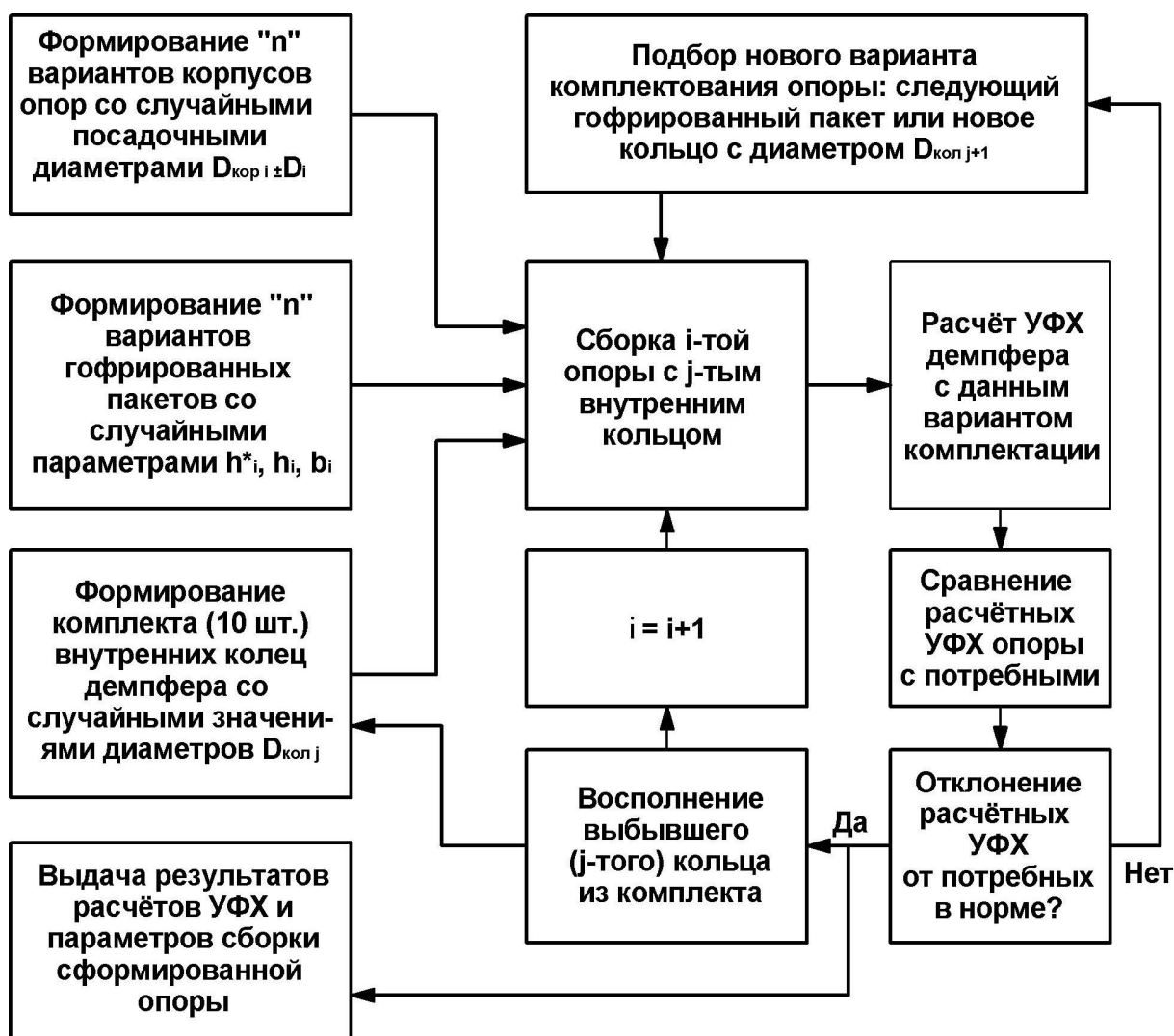


Рис. 6. Алгоритм программы, моделирующей серийное производство упругодемпферных опор с селективным подбором внутренних колец под потребные характеристики демпфирующих гофрированных пакетов

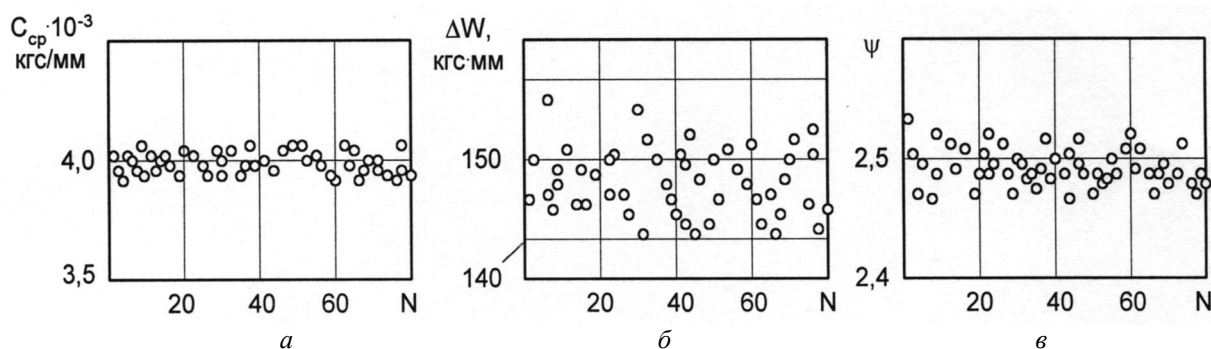


Рис. 7. Разбросы среднециклической жёсткости (а), рассеянной энергии (б) и коэффициента поглощения (в), полученные при моделировании серийного производства опор с гофрированными демпферами и внедрении селективного подбора внутренних колец по предложенному алгоритму

Обсуждение результатов

На базе созданных математических моделей многослойных гофрированных демпферов, виртуального серийного производства опор и обработки статистического материала, показано, что:

- при сложившемся сочетании допусков на изготовление деталей гофрированных демпферов в серийном производстве разброс УФХ довольно значителен и составляет для среднециклической жёсткости C_{cp} 58...70 %; для циклической рассеянной энергии ΔW – 40...43 %; для коэффициента поглощения ψ – 14...28%. Выяснено также, что статистические законы распределения УФХ многослойных демп-

феров не подчиняются нормальному закону. Наиболее вероятные значения этих характеристик на 20...30% меньше среднеарифметических, подсчитанных для всего объёма выборки;

- применением целенаправленной селективной сборки с введением в технологический процесс промежуточных расчётов упругофрикционных характеристик можно добиться высокой степени повторяемости параметров опор в серийном производстве, что в дальнейшем обеспечит стабильно низкий уровень вибрационного состояния двигателей при их серийном производстве.

Библиографический список

1. Glasserman P. Monte Carlo methods in financial engineering. New York: Springer, 2004. 596 p.
2. Иванов А.В., Саньков В.А., Смекалин О.П., Чипизубов А.В. Оценка периода повторяемости сильных землетрясений в зонах главного Саянского и Тункинского разломов по данным радиоуглеродного датирования и статистического анализа // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36, № 2. С. 70-80.
3. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method // Journal of the American Statistical Association. 2012. V. 44, Iss. 247. P. 335–341. doi: 10,1080/01621459.1949.10483310
4. Зубарев Ю.М., Косаревский С.В. Распространение ошибки методом Монте-Карло для анализа неопределённости расчёта соответствия позиционным допускам // Технология машиностроения. 2009. № 9. С. 42-45.
5. Ермаков В.В., Козловский В.Н. Прогнозирование стабильности технических характеристик стартер-генераторного устройства на стадии проектирования // ЭЭТ: Электроника и электрооборудование транспорта. 2009. № 1. С. 40-42.
6. Винокуров Г.Г., Плотникова Т.Н. Разработка метода Монте-Карло для описания формирования структуры порошковых материалов и покрытий // Фундамен-

тальные проблемы современного материаловедения. 2007. Т. 4, № 3. С. 21-25.

7. Хоанг Дык Туан., Герман Г.В. Имитационное моделирование нагрузки судовых электростанций на основе различных законов распределения // Морской вестник. 2009. № 2. С. 55-57.

8. Peralta-Babizas J.L., Torres-Torriti M., Guarini-Hermann M. A comparison of Bayesian prediction techniques for mobile robot trajectory tracking // Robotica. 2008. V. 26, Iss. 05. P. 571-585. doi.org/10.1017/s0263574708004153

9. Sai Preeti G., Vijay Kumar V., Sastry V.S.S., Murthy K.P.N. Monte Carlo study of radial and axial ordering in cylindrical films of liquid crystal // Computational Materials Science. 2008. V. 44, Iss. 1. P. 180-184. doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.01.036

10. Munkel C., Heermann D.W. The folding transitions of polymerized membranes. Heidelberg, 1994. 8 p.

11. Белоусов А.И., Пономарев Ю.К., Проничев Ю.Н., Крыпаев Д.Г. Теория кольцевого гофрированного демпфера при прецессионном движении вибратора //

Известия Вузов. Авиационная техника. 2009. № 2. С. 46-49.

12. Зрелов В.А., Карташов Г.Г. Двигатели «НК». Самара: Самарский дом печати, 1999. 288 с.

13. Белоусов А.И., Пономарев Ю.К. Прочностные и упругодемпфирующие характеристики многослойного гофрированного демпфера водородного насоса // Труды I международной науч.-техн. конференции «Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе». Воронеж: ООО РИФ «Кварта», 2001. С. 272-279.

14. Проничев Ю.Н., Пономарев Ю.К. Опыт борьбы с шумом и вибрацией, генерируемых полировальными станками типа Ш-15 // Международный научно-технический форум, посвящённый 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ. Сборник трудов в 3 томах. Том 2. «Международная научно-техническая конференция с участием молодых учёных «Динамика и виброакустика машин». Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2012. С. 126–127.

Информация об авторе

Пономарёв Юрий Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследователь-

ский университет). E-mail: ponomarev-ssau@yandex.ru. Область научных интересов: теория и практика виброзащиты, математическое моделирование гистерезисных систем, конструкционное демпфирование.

RESEARCH OF REPEATABILITY OF CHARACTERISTICS OF MULTILAYERED CORRUGATED DAMPERS OF AIRCRAFT AND ROCKET ENGINES USING THE MONTE - CARLO METHOD

© 2015 Yu. K. Ponomaryov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The purpose of the work is to analyze the repeatability of elastic damping properties of multilayered corrugated supports of aircraft and rocket engines in the conditions of out-of-tolerance production of component parts in mass production. The research is carried out by the calculation Monte-Carlo method with the use of ex-

perimentally confirmed laws of distribution of tolerances on the production of parts constituting the structure of a support. A mathematical model of virtual mass production of supports with multilayered corrugated dampers, a mathematical model of uniaxial static loading of a support, and, on their basis, a model of elastic hysteresis characteristics spread have been developed. Fields of dispersion of characteristics of supports have been investigated for different parameters of accuracy of production of the parts influencing the above characteristics. It has been found that statistical laws of distribution of elastic friction characteristics of multilayered dampers in supports are not subject to the normal law. The most probable values of these characteristics are 20-30% less than the arithmetic mean values calculated for the whole amount of sampling. The calculations showed that in common production practice of combination of tolerances on the production of damper component parts in mass production the variation of their characteristics is not unconsiderable, which results in the need of selection of parts with the required characteristics.

Aircraft engines, structural damping, multilayered support, energy dispersion, hysteresis, rigidity of support, vibroprotection, stability of characteristics.

References

1. Glasserman P. Monte Carlo methods in financial engineering. New York: Springer, 2004. 596 p.
2. Ivanov A.V., Sankov V.A., Smekalin O.P., Chipizubov A.V. Estimation of the Recurrence Period of Strong Earthquakes in Zones of the Main Sayan and Tunka Faults according to the Data of Radiocarbon Dating and Statistical Analysis. *Seismic Instruments*. 2010. V. 46, Iss. 4. P. 363-371. doi.org/10.3103/s0747923910040067
3. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*. 2012. V. 44, Iss. 247. P. 335-341. doi: 10.1080 / 01621459.1949.10483310
4. Zubarev Yu.M., Kosarevsky S.V. Error propagation by Monte-Carlo method to analyse calculation uncertainty of correspondence to positional tolerance. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2009. No. 9. P. 42-45. (In Russ.)
5. Ermakov V.V., Kozłowski V.N. Predicting the stability of the technical characteristics of the starter-generator device at the design stage. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2009. No. 1. P. 40-42. (In Russ.)
6. Vinokurov G.G., Plotnikova T.N. Development of the Monte-Carlo method for the description of formation of structure of powder materials and Coverings. *Basic Problems of Material Science*. 2007. V. 4, no. 3. P. 21-25. (In Russ.)
7. Hoang Dyk Tuan, Hermann G.W. Simulation of ship power plant load on the basis of various distribution laws. *Morskoy Vestnik*. 2009. No. 2. P. 55-57. (In Russ.)
8. Peralta-Babizas J.L., Torres-Torriti M., Guarini-Hermann M. A comparison of Bayesian prediction techniques for mobile robot trajectory tracking. *Robotica*. 2008. V. 26, Iss. 05. P. 571-585. doi.org/10.1017/s0263574708004153
9. Sai Preeti G., Vijay Kumar V., Sastry V.S.S., Murthy K.P.N. Monte Carlo study of radial and axial ordering in cylindrical films of liquid crystal. *Computational Materials Science*. 2008. V. 44, Iss. 1. P.180-184. doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.01.036
10. Munkel C., Heermann D.W. The folding transitions of polymerized membranes. Heidelberg, 1994. 8 p.
11. Belousov A.I., Ponomarev Yu.K., Pronichev Yu.N., Krypayev D.G. Theory of an annular corrugated damper in the vibrator precession motion. *Russian Aeronautics*. 2009. V. 52, Iss. 2. P. 201-207. doi.org/10.3103/s1068799809020111
12. Zrelov V.A., Kartashov G.G. *Dvigateli «NK» [NK engines]*. Samara: Samarskiy dom pechati Publ., 1999. 288 p.
13. Belousov A.I., Ponomarev Yu.K. Prochnostnye i uprugodempfiruyushchie kharakteristiki mnogoslownogo gofrirovannogo dempfera vodorodnogo nasosa. *Trudy I mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konferentsii «Razrabotka, proizvodstvo i ekspluatatsiya turbo-, elektronasosnykh agregatov i sistem*

na ikh osnove». Voronezh: Kvarita Publ., 2001. P. 272-279. (In Russ.)

14. Pronichev Yu.N., Ponomarev Yu.K. Practical experience of controlling noise and vibration generated by polishing machines of the SH-15 type. *International scientific and technical forum devoted to the 100th anniversary of JSC Kuznetsov and the 70th anniversary*

of SSAU. Collection of papers in 3 volumes. Volume 2. The international scientific and technical conference with the participation of young scientists «Dynamics and vibroacoustics of machines». Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2012. P. 126-127. (In Russ.)

About the Author

Ponomaryov Yury Konstantinovich, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Aircraft Engine Design, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [ponomarev-](mailto:ponomarev-ssau@yandex.ru)

ssau@yandex.ru. Area of Research: theory and practice of vibroprotection, mathematical modeling of hysteresis systems, structural damping.