

использования вычислительных методов обе главные части ГВС равноправны. Обмен информацией между ЭВМ и АВМ осуществляется по информационным каналам через ЦАП и АЦП. Прием информации от АВМ производится через АЦП на входной регистр процессора. Выдача информации из ЭВМ осуществляется через ЦАП с его выходных усилителей. Работу блока сопряжения можно проследить с помощью временной диаграммы (рис. 3). В соответствии с содержанием команд, поступающих от ЭВМ в БС, формируются сигналы, необходимые для работы преобразователей и выбора режима работы АВМ. Опрос каналов преобразователя АЦП может быть произведен со скоростью 10000 обращений в секунду. Выдача информации через ЦАП может достигать скорости 22000 обращений в секунду.

Сопоставление результатов численного и гибридного интегрирования, полученных в виде передаточных функций рассматриваемой системы при различных параметрах конструкционного гистерезиса, дало основание для утверждения о целесообразном использовании гибридных методов расчета при анализе существенно нелинейных систем со многими степенями свободы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кобцев А. Н.* Нагрузки, колебания механических систем и методы их измерения. Труды РКИИГА, Рига, 1971, вып. 189, сб. № 6.
2. *Кабанов Н. Н., Кобцев А. Н.* Нагрузки, колебания механических систем и методы их измерения. Труды РКИИГА, Рига, 1972, вып. 222, сб. № 9.
3. *Кабанов Н. Н., Перепелка В. И.* Автоматика и вычислительная техника. ИЭВТ АН ЛССР, Рига, 1975, № 2.

УДК 534.1:629.734.4:621.45.00.11

Ю. К. ПОНОМАРЕВ

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА УПРУГО-ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ДЕМПФЕРОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Предлагаемая методика создана на базе экспериментально-го исследования многослойных гофрированных пакетов, работающих в режиме одностороннего упора (рис. 1; а). Пакеты ком-

изготавливались из одинаковых гофрированных прокладок, изготовленных из термообработанной стальной (У8А-У12А, 65Г) пружинной ленты по ГОСТ 2416—65. Шероховатость контактных поверхностей пластины соответствовала восьмому классу чистоты. Перед экспериментом пластины смазывались маслом МС-20.

Определяющими параметрами в эксперименте были: начальный шаг гофра t , толщина пластины h , начальная высота гофра h^* , угол при вершине α , ширина пластины b , длина прямолинейного участка на склоне гофра e , число пластины n , число пролетов m , деформация y и модуль упругости ленты E . Вследствие идентичности состояния контактных поверхностей во всех исследуемых пакетах величина коэффициента трения в эксперименте не измерялась и не была введена в состав определяющих параметров.

Определяемыми параметрами были: сила P_1 на этапе нагрузки и P_2 — на этапе разгрузки (рис. 1, б). Для удобства исследования вместо сил P_1 и P_2 были использованы два других параметра — среднециклическая сила $R = 0,5(P_1 + P_2)$ и обобщенная сила трения $T = P_1 - P_2$. Из системы выделенных параметров по π -теореме [1] было найдено десять критериев подобия. Определяющие критерии находились в виде

$$\alpha, m, n, \bar{h} = \frac{h}{b}, \bar{h}^* = \frac{h^*}{t}, \bar{e} = \frac{e}{t}, \bar{\xi} = \frac{y}{h^*}, \bar{b} = \frac{b}{t}, \quad (1)$$

и определяемые — безразмерная среднециклическая сила \bar{R}^* и безразмерная обобщенная сила трения \bar{T}^* — в виде комплексов

$$\bar{R}^* = \frac{R t^3}{E I h^*}, \bar{T}^* = \frac{T t^3}{E I h^*}, \quad (2)$$

где $I = \frac{bh^3}{12}$ — момент инерции сечения одной прокладки.

Безразмерные параметры изменялись в эксперименте в следующих диапазонах: $n = (15-100)$, $m = (1-10)$, $\alpha = (0,314-0,524)$ рад, $\bar{h} = (0,0062-0,0186)$, $\bar{h}^* = (0,05-0,1)$, $\bar{e} = (0,2-0,4)$, $\bar{b} = (0,5-1,55)$, $\bar{\xi} = (0-1,0)$.

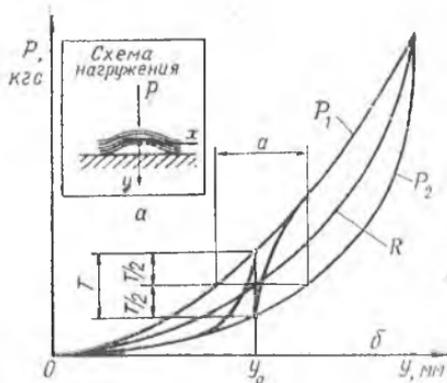


Рис. 1. К выбору определяемых параметров гофрированного пакета

Исследование влияния изменения критериев (1) на определяемые критерии (2) позволило найти их наиболее оптимальный вид:

$$\bar{R} = R t^3 / EI h^* n m k_m; \quad \bar{T} = T t^3 / EI h^* n^2 m k_m, \quad (3)$$

где $k_m = 4 - 3 \exp[-0,4(m-1)]$ — некоторая функция числа пролетов. При этом оказалось, что из всех критериев, определяемых в виде (1), безразмерные критерии (3) заметно зависят лишь от безразмерной деформации $\bar{\xi}$. Используя метод наименьших квадратов, нашли аналитический вид функции $\bar{R}(\bar{\xi})$ и $\bar{T}(\bar{\xi})$:

$$\bar{R}(\bar{\xi}) = |\operatorname{tg}(\pi \bar{\xi} / 2)| \{ 30 + [10 + 50(1 - \bar{\xi})] \sigma_0(\bar{\xi} - 0,6) \};$$

$$\bar{T}(\bar{\xi}) = 0,16 \bar{\xi} + 0,4 \bar{\xi}^2 - [6,222(\bar{\xi} - 0,7)^2 \sigma_0(\bar{\xi} - 0,7)],$$

где $\sigma_0(x)$ — импульсная функция Хевисайда

$$\sigma_0(x) = 1, \text{ если } x \geq 0;$$

$$\sigma_0(x) = 0, \text{ если } x < 0.$$

Окончательное выражение для расчета внешней петли гистерезиса многослойных пакетов имеет вид

$$P(y, \nu) = nm h^* EI k_m t^{-3} [\bar{R}(\bar{\xi}) + (-1)^{\nu+1} 0,5 n \bar{T}(\bar{\xi})], \quad (4)$$

где величина ν , условно названная параметром загрузки, для нагрузочной ветви равна единице, а для разгрузочной — двум. Под термином «внешняя петля» гистерезиса здесь понимается петля, полученная при циклическом деформировании пакета на величину, равную начальной высоте гофра.

Если же деформирование пакета осуществляется из некоторой точки y_0 , лежащей на одной из ветвей внешней петли (рис. 1, б), следует пользоваться зависимостью

$$P(y, y_0, \nu) = mn h^* EI t^{-3} k_m \left\{ \bar{R}(\bar{\xi}) + (-1)^{\nu+1} \cdot 0,5 n \bar{T}(\bar{\xi}) + (-1)^\nu n \bar{T}(\bar{\xi}_0) \exp \left[- \frac{10 |\bar{\xi} - \bar{\xi}_0|}{n \bar{a}(\bar{\xi}_0)} \right] \right\}, \quad (5)$$

где $\bar{\xi}_0 = y_0 / h^*$, а безразмерная обобщенная деформация $\bar{a}(\bar{\xi})$ также является единственной функцией относительной деформации и определяется достаточно точно из выражения

$$\bar{a}(\bar{\xi}) = a / nh^* = 0,00625 \bar{\xi} - 0,0148 (\bar{\xi} - 0,35)^2 \cdot \sigma_0(\bar{\xi} - 0,35), \quad (6)$$

где обобщенная деформация a равна отрезку, отсекаемому процессами P_1 и P_2 внешней петли гистерезиса и проходящему через середину отрезка T параллельно оси y (рис. 1, б).

Зависимости (4) — (6) позволяют рассчитать поле упруго-гистерезисных петель плоского многослойного демпфера, который может быть использован для демпфирования агрегатов с фланцевым креплением.

Для демпфирования колебаний трубопроводов и роторов ГТД применяются демпферы кольцевого типа (рис. 2, а). Рассмотрим методику расчета упруго-фрикционных характеристик такого демпфера при циклическом перемещении вибратора демпфера вдоль оси Y . Для простоты примем, что геометрические параметры всех пролетов демпфера одинаковы. Угловое положение каждого пролета относительно вертикальной оси обозначим через φ_i :

$$\varphi_i = \varphi_0 + \frac{2\pi}{m} (i - 1),$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, m$, а φ_0 — угловая координата первого пролета (рис. 2, а).

Обозначим текущее смещение вибратора вдоль оси Y через y_n , а коэффициент трения скольжения пары «вибратор-гофрированный пакет» через f . Будем считать, что демпфер собран в опоре с некоторым натягом, причем поджатия всех пакетов одинаковы и составляют величину y_n , связанную с радиальным зазором в демпфере δ соотношением

$$y_n = h^* - \delta.$$

Рассмотрим сразу процесс повторного деформирования демпфера. Условно примем, что нагружение демпфера осуществляется при движении вибратора в направлении, совпадающем с положительным направлением оси Y , а разгружение — в противоположном направлении. Тогда, изменяя на этапе нагружения значения смещения вибратора y_n в диапазоне от $-A$ до $+A$, а на этапе разгружения — от $+A$ до $-A$, необходимо вычислять значения нормальных сил на вершинах гофров по формуле

$$P_i(y_i, y_{0i}, \nu_i) = nh^* k_m t^{-3} EI \{ \bar{R}(\bar{\xi}_i) + (-1)^{\nu_i+1} \times \\ \times 0,5 n \bar{T}(\bar{\xi}_i) + (-1)^{\nu_i} n \bar{T}(\bar{\xi}_{0i}) \exp \left[- \frac{10 |\bar{\xi}_i - \bar{\xi}_{0i}|}{n \bar{\alpha}(\bar{\xi}_{0i})} \right] \},$$

($i = 1, 2, 3, \dots, m$),

$$\text{где } \bar{\xi}_i = y_i/h^*; \quad \bar{\xi}_{0i} = y_{0i}/h^*; \quad y_i = y_n + y_n \cos \varphi_i; \quad y_{0i} = y_n + \\ + (-1)^{\nu_i} |A| \cos \varphi_i,$$

ν_i — параметр загрузки демпфера в целом, принятый равным единице на этапе нагрузки и двум — на этапе разгрузки.

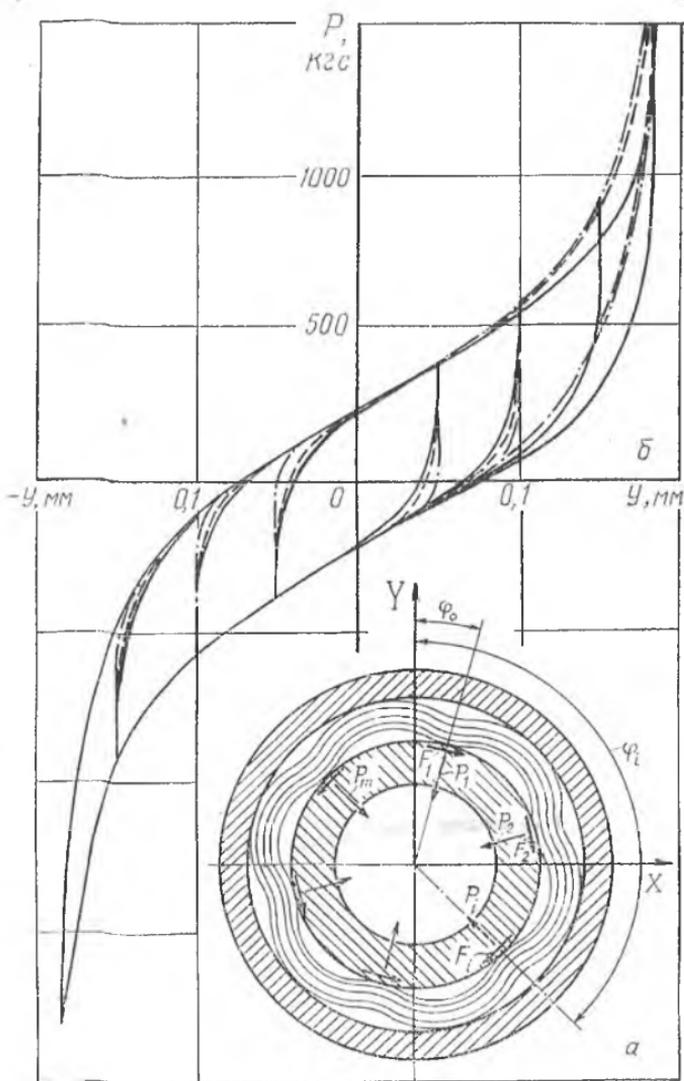


Рис. 2. Поле упруго-гистерезисных петель кольцевого гофрированного демпфера:
 ——— расчетная линия с использованием Кулона-Амонтона;
 ——— расчетная линия с использованием разработанной модели трения в контакте;
 ——— экспериментальная линия

Этот параметр связан с параметром загрузки i -го гофрированного пролета следующими соотношениями:

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \gamma_d = 1 \text{ и } \operatorname{sign}(\cos \varphi_i) = 1; \\ 2, & \text{если } \gamma_d = 1 \text{ и } \operatorname{sign}(\cos \varphi_i) \neq 1; \\ 1, & \text{если } \gamma_d = 2 \text{ и } \operatorname{sign}(\cos \varphi_i) \neq 1; \\ 2, & \text{если } \gamma_d = 2 \text{ и } \operatorname{sign}(\cos \varphi_i) = 1. \end{cases}$$

Силы трения F_i^* в местах контакта вершин гофров с вибратором в первом приближении можно подсчитать, воспользовавшись законом Кулона-Амонтона: $F_i^* = f P_i$.

Спроектировав все силы, в том числе и силы трения, развивающиеся в контактах гофров с вибратором, на ось Y , получим силу сопротивления демпфера, зависящую для данных геометрических параметров пакета от смещения вибратора y_v и параметра загрузки γ_d в виде

$$P(y_v, \gamma_d) = \sum_{i=1}^m [P_i \cos \varphi_i + (-1)^{\gamma_d+1} \cdot F_i^* |\sin \varphi_i|].$$

Поле петель гистерезиса, полученное расчетным путем по настоящей методике и экспериментально, приведено на рис. 2, б.

К недостаткам методики следует отнести наличие у расчетных петель вертикальных участков, которые получаются при использовании закона Кулона-Амонтона.

Исследования ряда авторов [2]—[4] показывают, что сила трения в контакте достигает своего предельного значения не мгновенно, а на протяжении определенной зоны проскальзывания, именуемой «зоной предварительного смещения» [3]. Это свойство положено в основу обобщенной математической модели сухого трения, разработанной Ю. П. Бусаровым [5], которой можно воспользоваться для более точного расчета сил трения в контакте. Однако модель Ю. П. Бусарова даст удовлетворительные результаты в диапазоне амплитуд взаимных проскальзываний в контакте, больших зоны предварительного смещения.

Поскольку амплитуды смещений вибратора в демпферах современных ГТД малы (0,1—0,15 мм), тангенциальные смещения вершин гофрированного пакета относительно вибратора являются соизмеримыми с величиной зоны предварительного смещения. В этом случае лучшие результаты дает следующая модель сухого трения:

$$F_i = F_{i1} - [F_{i1} + (-1)^{\gamma_d} F_i^*] (1 - \exp[-k \frac{F_i^*}{(F_i^* + (-1)^{\gamma_d} F_{i1})} (-1)^{\gamma_d+1} \times (\tau_i - \tau_{i1})]), \quad (7)$$

где $F_{i1} = -F_i^* (1 - \exp[-kA |\sin \varphi_i|])$ и $\tau_{i1} = -A |\sin \varphi_i|$ — координаты точки, из которой начинается процесс проскальзывания контак-

тирующих элементов, и лежащей в декартовой системе координат $F_i - \tau_i$ (сила трения — взаимное проскальзывание) между двумя асимптотами $+F_i^*(\tau_i)$ и $-F_i^*(\tau_i)$; $\tau_i = y_v \cdot |\sin \varphi_i|$; k — константа, косвенно характеризующая протяженность зоны предварительного смещения, измеренная в 1/мм.

Математическая модель сухого трения в виде выражения (7) примечательна тем, что в ней реализуется принцип Мазинга [6], являющийся неотъемлемым свойством систем конструкционного демпфирования [7]. Результаты расчета нагрузочных кривых кольцевого демпфера с использованием разработанной модели сухого трения показаны на рис. 2, б пунктиром.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алибужев П. М.* и др. Теория подобия и размерностей. Моделирование. М., «Высшая школа», 1968.
2. *Максак В. И., Митрофанов Б. П.* Упругое предварительное смещение дискретного контакта при сложном нагружении. — В кн.: Контактные задачи и их инженерные приложения. М., изд-во ИИИМаш, 1969.
3. *Коняхин И. Р.* Теория предварительных смещений применительно к вопросам контактирования деталей. Томск, изд-во Томского университета, 1965.
4. *Бойден Ф. И., Тейбор Д.* Трение и смазка твердых тел. М., «Машиностроение», 1968.
5. *Бусаров Ю. П.* Исследование и учет гистерезисных свойств амортизаторов при расчете систем виброизоляции. Автореф. канд. дис. М., 1965.
6. *Masing G.* — Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens — Konzern. Bd. 5, 135, 1926.
7. *Страхов Г. И.* Инженерные задачи статики, динамики и устойчивости систем с большим гистерезисом. Автореф. докт. дис., Рига, АН Латв. ССР, 1969.

УДК 534.62—413/—415

И. Д. СТЕПАНЕНКО, В. И. ВЯКИН

УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Высокочастотные усталостные испытания материалов в условиях плоского напряженного состояния при поперечном изгибе обычно проводят на образцах, выполненных в виде круглых [1] или кольцевых [2] пластин.