

Таким образом, определив амплитуду динамических напряжений согласно выражению (20) и приняв в нем $\epsilon_{экр} = \epsilon_{пэкр}$, по уравнению кривой усталости (2) можно оценить долговечность компенсатора.

Библиографический список

1. Итбаев В.К., Хусайнов Ф.С. Демпфирующие характеристики компенсаторов //Тр. НИИД. - М., 1984. - Ч. П. - С. 116-122.
2. Сорокин Е.С. Уравнение динамической упругости с учетом внутреннего трения //Вопросы механики в приложении к транспорту и строительству. - М.: НИИТ, 1971. - Вып. 343. - С. 3-14.
3. Вибрации в технике. - М.: Машиностроение, 1978. - Т. I.
4. Андреев Л.Е. Упругие элементы приборов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1981. - 392 с.
5. Огибалов П.М., Колтунов М.А. Оболочки и пластины. - М.:Изд-во МГУ, 1969. - 695 с.
6. Писаренко Г.С. О новом подходе к описанию контура петли гистерезиса в теории механических колебаний //Проблемы прочности. - 1971. - № 6. - С. 21-22.

УДК 620.178.311

Г.В.Лазуткин, А.М.Уланов, А.К.Анохин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ ИЗ МАТЕРИАЛА МР ПРИ МНОГОФАКТОРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Виброзащитные системы (ВС) на основе материала МР широко применяются для снижения вибрационной напряженности агрегатов и узлов ДЛА в условиях одновременного воздействия вибрационных, ударных и постоянно действующих перегрузок. Однако ни экспериментальных, ни теоретических результатов исследования поведения ВС в подобных условиях не имеется. Это объясняется как отсутствием специального испытательного оборудования для многофакторного нагружения ВС, так и трудностями теоретического решения задачи, связанными с неоднозначной зависимостью упруго-демпфирующих характеристик виброизоляторов из МР от деформации (оци -

сание этой зависимости требует проведения большого объема предвари-
тельных экспериментальных работ).

Целью настоящей работы является определение динамических харак-
теристик виброизоляторов из МР при многофакторном нагружении на ос-
нове математической модели деформирования, использующей возможно
меньший объем экспериментальных данных.

При многофакторном возбуждении ВС с одной степенью свободы диф-
ференциальное уравнение движения может быть записано в виде

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + P(x, \text{sign} \frac{dx}{dt}, x_0, x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = \quad (I)$$

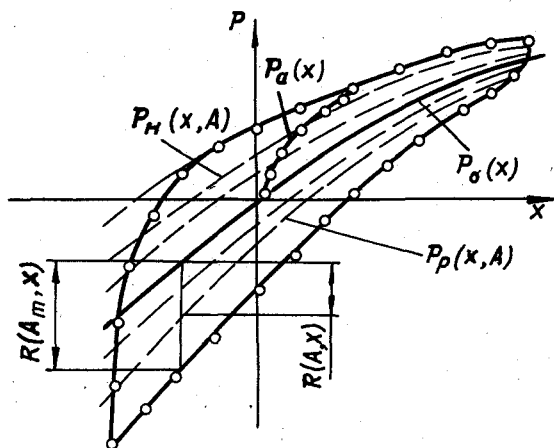
$$= F(t) + \sigma(t - \tau_y) Q(t) + G,$$

где m - масса ВС; x, P - соответственно деформация и реакция
виброизолятора; $F(t), \sigma(t - \tau_y) Q(t), G$ - соответственно вибрацион-
ная, ударная и постоянно приложенная нагрузка во времени t , при-
чем

$$\sigma(t - \tau_y) = \begin{cases} 0 & \forall t \in [0; t_0) \cup [\tau_y; \infty) \\ 1 & \forall t \in [t_0; \tau_y) \end{cases};$$

t_0 - момент приложения ударной нагрузки; τ_y - длительность уда-
ра; $[x_0, x_1, \dots, x_i, \dots, x_n]$ - совокупность точек смены знака скоро-
сти (предыстория нагружения). Количество значений x_i может быть
достаточно велико, что при численном интегрировании уравнения (I)
требует применения специального алгоритма для вычисления реакции ви-
броизолятора. Построение алгоритма основывается на математической мо-
дели деформирования, включающей в себя линии, которые соединяют вер-
шины петель гистерезиса с одинаковой амплитудой при различной пред-
варительной статической деформации, а также линию, соединяющую цент-
ры этих петель [1]. Эти линии, форма которых интегрально учитывает
упругодемпфирующие свойства виброизоляторов из МР, могут определять-
ся либо на основе полученных теоретически рекуррентных соотношений,
либо экспериментально. Как правило, теоретическое решение задачи о
деформировании виброизоляторов из материала МР неточно из-за неопре-
деленности значений коэффициента трения между проволочными спиральми
в МР, сдавливающих нагрузок между ними и т.п. Поэтому более целесо-
образным представляется экспериментальное получение линий. Однако

последнее требует большого объема экспериментальных работ, сокращение которого является одной из задач проводимого исследования.



Р и с. I. Определение коэффициентов математической модели

Анализ сложных систем конструкционного демпфирования, к которым относятся и виброизоляторы из МР [1], позволяет утверждать, что линия центров петель $P_0(x)$ (рис. I) может быть найдена как полу-сумма процессов нагрузки и разгрузки при полном расслоении материала МР. Подобное состояние характеризуется проскальзыванием всех или, по крайней мере, основной части контактов проволок МР и, очевидно, реализуется на значительных участках процессов деформирования с максимально допустимой амплитудой A_m . Для виброизоляторов типа ДКУ и 7Я.ВР-5 это происходит на участке $x \in [-0,7A_m; 0,7A_m]$.

Заметим также, что в общем случае для линий вершин петель гистерезиса, разделяемых с помощью ступенчатой функции $\sigma = \pm 1$ на вершины процессов нагрузки $P_H(x, A)$, $\sigma = +1$ и разгрузки $P_P(x, A)$, $\sigma = -1$, можно записать (см. рис. I, [1])

$$P_{H,P}(x, A) = P_0(x) + \sigma R(A, x),$$

где $R(A, x)$ — функция расслоения. Представим последнее выражение с учетом функций, описывающих процессы полного расслоения, в виде

$$P_{H,P}(x, A) = P_0(x) + \sigma R(A_m, x) T(A, x),$$

где $T(A, x) = \frac{R(A, x)}{R(A_m, x)}$; $R(A_m, x)$ - значение функции расслоения при $A = A_m$.

Экспериментальное исследование функции $T(A, x)$ для различных классов виброизоляторов из МР показывает, что она практически не зависит от x и определяется только значениями A , т.е.

$$T(A, x) \approx T(A) \text{ и } P_{H,P}(A, x) = P_0(x) + \sigma R(A_m, x) T(A).$$

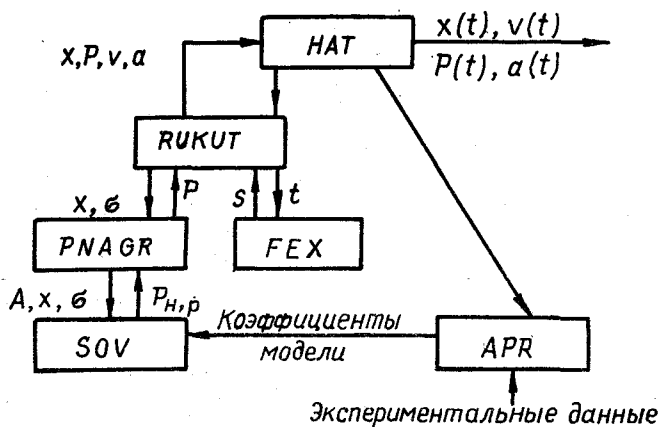
Причем функцию $T(A)$ можно определить, например, с помощью линии первичного нагружения $P_a(x)$. Эта линия, как показано в работе [1], отображает одновременно и множество вершин петель гистерезиса, для которых $x \approx A$. Вследствие этого справедливо выражение

$$T(A) = \frac{P_a(x) - P_0(x)}{R(A_m, x)}.$$

Таким образом, для построения математической модели деформирования виброизоляторов из МР достаточно экспериментально определить линию первичного нагружения в диапазоне деформаций от 0 до A_m , а затем петлю гистерезиса с амплитудой деформации A_m (на рис. 1 они изображены точками). Это позволяет найти функцию $T(A)$, справедливую для участков полного расслоения, и с помощью выражения (2) найти линии вершин петель гистерезиса. При таком подходе к построению рассматриваемой модели деформирования количество экспериментальных точек сокращается до 25...35, а погрешность описания произвольных процессов деформирования, найденная в качестве примера для виброизоляторов типа "двойной колокольчик" ДКУ-48-5/15 и ступочного типа 7Я.ВЛ-5, не превышает 3%.

На основе математической модели деформирования виброизоляторов из МР и рассмотренных принципов получения данных, необходимых для построения модели, разработана программа, позволяющая определять текущие значения перемещения, реакции, вибро скорости и вибро ускорения ВС при многофакторном нагружении.

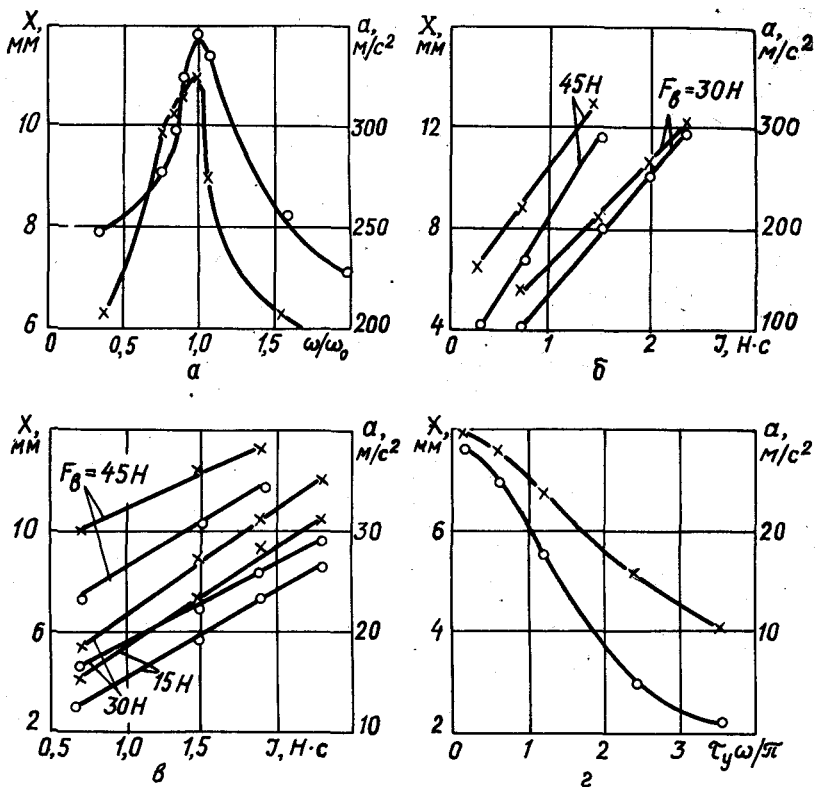
Программа включает в себя шесть подпрограмм (рис. 2). В подпрограмме *RUKUT* осуществляется численное решение уравнения (1). Подпрограмма *PEX* вычисляет текущее значение нагрузки $S = F(t) + \omega(t - t_0) Q(t) + G$ по заданным пользователем законам изменения ее составляющих во времени. Подпрограмма *PNAGR* вычисляет реакцию виброизолятора при помощи линий вершин по приведенному в [1]



Р и с. 2. Блок-схема программы

алгоритму. Линии вершин рассчитываются по коэффициентам математической модели подпрограммой *SOV*. Эти коэффициенты находятся подпрограммой *APR* по экспериментальным точкам, описывающим линию первичного нагружения и предельную петлю гистерезиса с амплитудой A_m . Подпрограмма *НАТ* организует работу всех подпрограмм, ввод и вывод информации.

В качестве примера математического эксперимента с использованием программы было проведено исследование одновременного воздействия ударного импульса полусинусоидальной формы длительностью τ_y , виброаппонной нагрузки $F(t) = F_0 \sin \omega t$ и постоянной нагрузки G на ВС с виброизолятором типа ДКУ-48-5/15. Результаты исследования приведены на рис. 3. Рассматривалось воздействие удара на ВС, совершающую установившиеся колебания под действием виброаппонной нагрузки. Наибольшие значения деформации X и ускорения a на защищаемом объекте достигаются при совпадении частоты виброаппонной нагрузки с резонансной частотой ВС при данном уровне возбуждения ω_0 (рис. 3, а) и при фазе колебаний ВС в момент начала удара $\omega t \in [-0,1\pi; +0,1\pi] + 2\pi k$. Поскольку при коротком ударе (отношение времени удара к периоду собственных колебаний гораздо меньше 1) динамические характеристики системы не зависят от формы импульса, в качестве обобщенной характеристики удара принят импульс силы
$$J = \int_{t_0}^{t_0 + \tau_y} \sigma(t - \tau_y) a(t) dt.$$



Р и с. 3. Исследование многофакторного нагружения: \circ - значения X , \times - значения a ; а - зависимость X, a от частоты вибрационной нагрузки ($T = 1,44$ H·c, $F_\delta = 45$ H, $G = 10$ H); б, в - зависимость X, a от амплитуды вибрационной нагрузки и импульса силы удара (б - $G = 10$ H, в - $G = 50$ H); г - зависимость X, a от отношения длительности удара к периоду вибрационной нагрузки ($T = 2,3$ H·c, $F_\delta = 10$ H, $G = 50$ H)

На рис. 3,б, в представлены максимальные значения x и a при различных амплитудах вибрационной нагрузки F_B и импульсах силы J при коротком ударе. При длинном ударе (рис. 3,г) максимальные значения x и a уменьшаются с увеличением отношения периодов нагрузки.

Таким образом, определив экспериментально линию первоначального нагружения и петлю гистерезиса с амплитудой A_m исследуемого виброизолятора и воспользовавшись разработанной программой, можно рассчитать динамические характеристики ВС с одной степенью свободы при многофакторном нагружении.

Библиографический список

1. Лазуткин Г.В., Уланов А.М. Математическая модель деформирования виброизоляторов из материала МР //Изв. вузов. Авиационная техника. 1988. - № 3. - С. 30-34.

УДК 621.438-226:533.6.011

В.В.Малыгин, С.В.Поздеев

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВИБРОНАПРЯЖЕННОСТИ РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН В НЕСТАЦИОНАРНОМ ПОТОКЕ. ЧАСТЬ I

Повышенный интерес к вопросам динамики рабочих колес (РК) турбомашин при нестационарном обтекании лопаток турбулентным потоком обусловлен главным образом двумя обстоятельствами - недостаточной изученностью отдельных аспектов проблемы и неизбежностью возникновения реакции РК на нестационарные аэродинамические возмущения, которые характеризуются многообразием и большим числом источников их возникновения в условиях эксплуатации турбомашин. Актуальной также является разработка надежных методов оценки интенсивности стохастических колебаний (СК), возникающих как результат взаимодействия РК с нестационарным потоком, в условиях эксплуатации на стадии стендовой вибропрочностной доводки турбомашин.

Главной причиной колебаний РК служит окружающая неоднородность поля