

выделенных критериев подобия может привести к серьезным ошибкам.

Следует иметь в виду, что в настоящей работе рассматривается неполное подобие по упруго-фрикционным свойствам, так как установление факта приближенного выполнения соотношений подобия, связывающих силу и перемещение базового изделия соответственно с силой и перемещением других типоразмеров изделия в месте крепления его к колеблющейся системе не обязательно является следствием приближенного выполнения этих соотношений для любых сходственных точек или сечений изделия. В силу существующих трудностей рассмотрение полного подобия по упруго-фрикционным свойствам реальных изделий обычно весьма сложно. Поэтому для изделий, осуществляющих сосредоточенное демпфирование колеблющейся системы, целесообразно ограничиться рассмотрением подобия в смысле, указанном в [3], так как условия на границе изделия (в месте крепления его к колеблющейся системе) вполне определяют поведение колеблющейся системы.

Естественно, необходимыми и достаточными условиями рассматриваемого подобия является численная одинаковость независимых критериев подобия, оказывающих заметное влияние на обобщенные УФХ изделия (изменение их нарушает единственность обобщенных УФХ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Эскин И. Д., Пономарев Ю. К. К вопросу определения обобщенных упруго-фрикционных характеристик демпферов и амортизаторов с конструкционным демпфированием. Статья в настоящем сборнике.
2. Эскин И. Д. Исследование обобщенных упруго-фрикционных характеристик демпферов и амортизаторов авиационных двигателей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, КуАИ, Куйбышев, 1973.
3. Эскин И. Д., Пономарев Ю. К. К вопросу подобия систем конструкционного демпфирования по упруго-фрикционным свойствам. В сб.: «Вопросы виброизоляции оборудования и приборов». Ульяновский политехнический институт, 1974.
4. Соيفер А. М. и др. Материал МР. Авторское свидетельство № 183174, 1966.

**И. Д. Эскин, Ю. К. Пономарев**

#### **К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ УПРУГО-ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕМПФЕРОВ И АМОРТИЗАТОРОВ С КОНСТРУКЦИОННЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ**

В работе приведены упруго-фрикционные характеристики (УФХ) втулок из материала МР (рис. 1а)\*, двусторонних упруго-гистерезисных упоров, набранных из двух многослойных

\* Рис. 1 см. на стр. 36.

гофрированных пакетов (рис. 1 л), многослойных пакетов (рис. 1 а, в, ж), тросовых амортизаторов (рис. 1 з, и). УФХ найдены в виде единственного поля упруго-гистерезисных петель, построенного в критериальных координатах  $\eta-\xi$ , определяемых соотношением (1) [2], и зависимостей коэффициента рассеивания  $\Psi$  и средней относительной жесткости  $\gamma$ , определяемых соотношениями (2) [2], от безразмерной амплитуды циклической силы  $\eta_0$ , определяемой соотношением (3) [2], и других безразмерных параметров устройств. Эти УФХ являются обобщенными, так как удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к обобщенным УФХ [1]. Они справедливы для весьма широких и практически важных диапазонов значений определяющих параметров.

Так, например, для амортизаторов-втулок найденные обобщенные УФХ справедливы в диапазоне параметров, указанном в [2]; для двустороннего упора (рис. 1 л) при  $n=15$  и более пластин в каждом пакете,  $\bar{b} = \frac{b}{t_r} = 0,625 \div 0,95$ ,  $\bar{h} = \frac{h}{t_r} = 0,005 \div 0,027$ ,  $\bar{R} = \frac{R}{t_r} = 0,6 \div 1,2$ , угле при вершине гофра  $\varphi_r = 0,13 \div 0,35$  рад.,  $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{t_r} = 0 \div 0,25$ , шаге гофров  $t_r = 20 \div 26$  мм, ширине пластин  $b = 15 \div 22$  мм, толщине  $h = 0,185 \div 0,65$  мм, радиусе вершин гофров  $R = 13 \div 30$  мм, длине прямого участка склона гофра  $l_1 = 0 \div 5,8$  мм; для многослойного пакета (рис. 2а, в, ж) при  $n=17$  и более, числе гофрированных лент в каждой из двух групп гофрированных лент  $n_r = 3$  и более,  $\bar{b} = \frac{b}{l} = 0,78 \div 2,45$ ,  $\bar{h} = \frac{h}{l} = 0,015 \div 0,06$ ,  $\bar{l} = \frac{l}{t_r} = 0,355 \div 0,655$ ,  $\bar{R} = 0,51 \div 2,15$ ,  $\varphi_r = 0,11 \div 0,23$  рад.,  $\bar{l}_1 = 0,3$ ,  $\eta_{он} = \frac{P_0 + G}{T} \leq 5$ , длине пролета  $l = 8 \div 18,5$  мм,  $b = 10 \div 20$  мм,  $h = 0,186 \div 0,485$  мм,  $t_r = 22 \div 36$  мм,  $R = 11,7 \div 48,67$  мм,  $l_1 = 0 \div 10,9$  мм, смещении вершины гофра относительно середины пролета  $\bar{s} = \frac{s}{l} = 0$ . Здесь  $P_0$  — амплитуды циклической силы,  $G$  — постоянная составляющая циклической силы.

Пластины многослойных пакетов (рис. 1 а, в, ж) выполнены из каленой ленты второй и третьей группы прочности по ГОСТ 2614—65, лента изготовлена из пружинных сталей 60С2А, 65Г, У8А, У9А, У10А со смазанными, обезжиренными, обезжиренными и затем омедненными контактными поверхностями. И, наконец, для тросовых амортизаторов (рис. 1 з, и), выполненных из тросов крестовой двойной свивки типа ЛКО конструкции  $6 \times 7(1+6) + 1 \times 7(1+6)$  по ГОСТ 3066—60, крестовой двойной свивки типа ТК конструкции  $6 \times 19(1+6+12) + 1$  о. с. по ГОСТ 3070—66 и крестовой свивки типа ТК конструкции

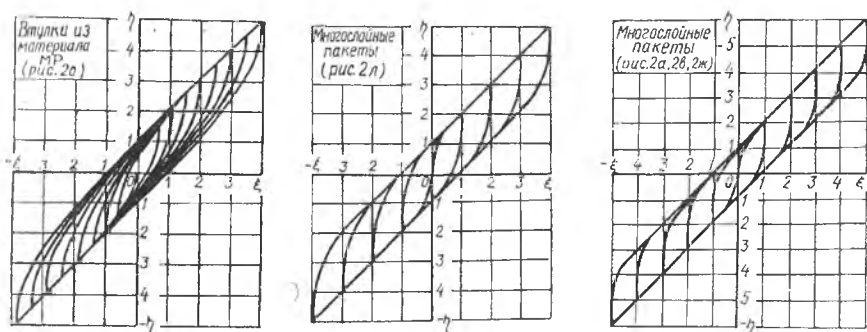


Рис. 1

$1 \times 37(1+6+12+16)$  по ГОСТ 3064—66, с числом проволок в тросе  $n=7 \div 119$ , относительным диаметром троса  $\bar{D} = \frac{D}{l} = 0,25 \div 0,52$ , углом свивки проволок в прядь (или углом свивки первого слоя троса)  $\varphi_1 = 0,1 \div 0,2$  рад, углом свивки прядей в трос (или углом свивки второго слоя)  $\varphi_2 = 0,13 \div 0,25$  рад., углом свивки третьего слоя  $\varphi_3 = 0,13 \div 0,23$  рад., диаметром троса  $D = 1,5 \div 17,5$  мм, длиной пролета амортизатора  $l = 6 \div 60$  мм, с числом отрезков тросов в амортизаторе  $n_1 = 1 \div 12$ .

Для указанных диапазонов безразмерных параметров устройств (рис. 1 а, в, ж, л, о) на рис. 1 показаны обобщенные по-

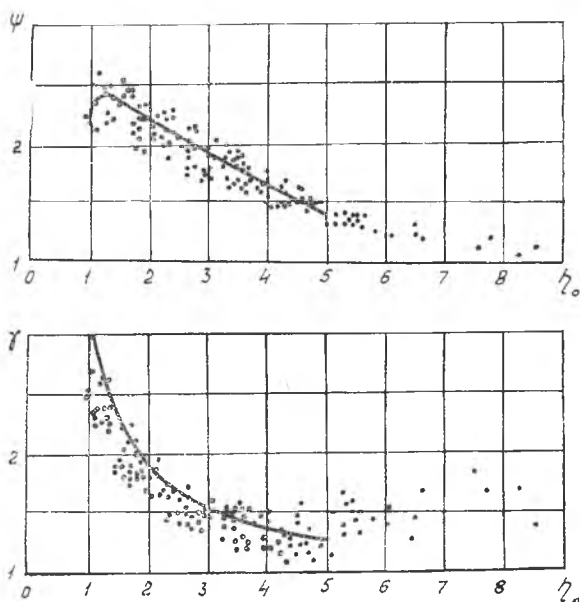


Рис. 2

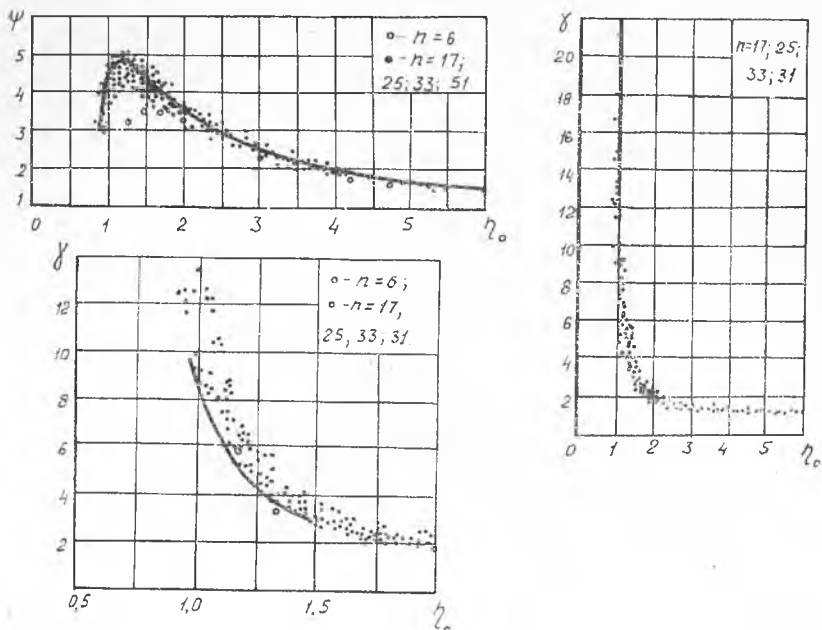


Рис. 3

ля упруго-гистерезисных петель, заданные таблично в [2]. На рис. 2, 3, 4 построены зависимости  $\Psi(\eta_0)$ ,  $\gamma(\eta_0)$  втулок (рис. 2 о÷п) и зависимости  $\Psi(\eta_0, p)$  и  $\gamma(\eta_0, p)$  многослойных пакетов (рис. 2 а÷ж, л), где сплошными линиями построены обобщенные УФХ  $\Psi(\eta_0)$  и  $\gamma(\eta_0)$ , определенные для таблично заданных обобщенных полей петель. На рис. 5 показаны УФХ  $\Psi(\eta_0, n)$ ,  $\gamma(\eta_0, n)$  тросовых амортизаторов (рис. 1 з, и).

Допустимость осреднения единственным обобщенным полем действительных полей исследованных типоразмеров изделия, построенных в критериальных координатах  $\eta$ — $\xi$ , в работе доказана путем сравнения результатов численного решения на ЭВМ БЭСМ-4 задачи о вынужденных колебаниях под действием безразмерной гармонической силы осцилляторов с демпфирующими устройствами (рис. 1 а, в, ж, о) с обобщенными полями и с крайними отклонениями полей петель, построенных в координатах  $\eta$ — $\xi$ .

Наибольший разброс в величинах резонансной безразмерной частоты  $\bar{\omega}_p = \frac{\omega_p}{\omega_{рас}}$  и безразмерной резонансной амплитуды  $\mu_p = \frac{AC_p}{F_0}$ , определенный при постоянном значении безразмерной амплитуды возбуждающей силы  $\beta = \frac{F_0}{T} = \text{const}$ , получился для амор-

тизаторов-втулок из МР (рис. 1о) и равен для  $\rho_p \approx 54\%$ , для  $\bar{\omega}_p \approx 10\%$ .

Здесь  $\omega_{рас} = \sqrt{\frac{C_p}{m}}$ ,  $m$  — масса груза,  $F_0$  — амплитуда возбуждающей силы,  $C_p$  — жесткость расслоенного устройства, определяемая соотношением (4) [2].

Этот разброс может быть несколько уменьшен, если отдельно учесть влияние на обобщенные УФХ критериев подобия  $\bar{d}$  [2] и коэффициента трения скольжения на контактных поверхностях втулки  $f$ , сузив диапазон значений этих параметров до пределов, обычно применя-

емых на практике ( $\bar{d} = 7 \div 11$ , смазанные контактные поверхности). С ростом безразмерных параметров  $\bar{d}$  и  $f$  происходит ухудшение демпфирующих свойств втулок — падение коэффициента рассеивания при  $\eta_0 = \text{const}$ . Для других исследуемых устройств также можно указать критерии подобия, изменение которых оказывает заметное влияние на их демпфирующие свойства. Так, у многослойных пакетов (рис. 1 а, в, ж) смещение вершины гофра от середины пролета в любую сторону — изменение критерия  $\bar{S}$  [2] ведет к снижению коэффициента рассеивания при  $\eta_0 = \text{const}$ . У тросовых амортизаторов рост критерия подобия  $\Pi_\phi = \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k$  ведет к возрастанию коэффициента рассеивания при  $\eta_0 = \text{const}$ . Здесь  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k$  — углы свивки проволок в прядь, прядей в трос или проволок в отдельные слои троса.

Пригодность обобщенных УФХ, определенных из статики для решения динамических задач, доказана экспериментально [3] только для случая многослойных пакетов (рис. 1 а, в, ж). Динамические исследования других устройств не проводились или проводились в недостаточном объеме.

Построение обобщенного поля упруго-гистерезисных петель, единственного для широкого круга типоразмеров изделия, устанавливает факт подобия по упруго-фрикционным свойствам этих типоразмеров в смысле, указанном в [1, 2].

Вследствие неполноты системы определяющих параметров изделия может встретиться случай, когда критерии подобия,

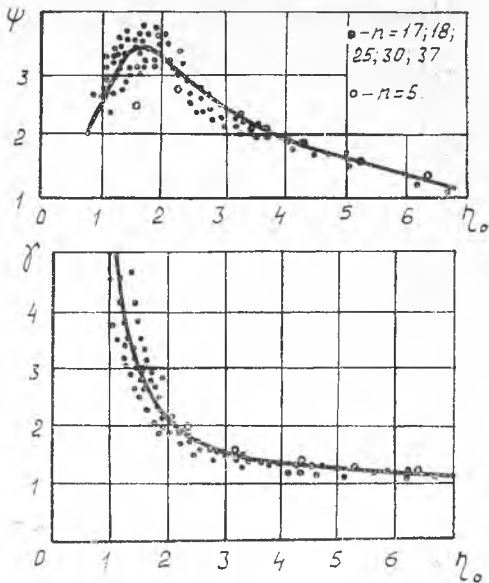


Рис. 4

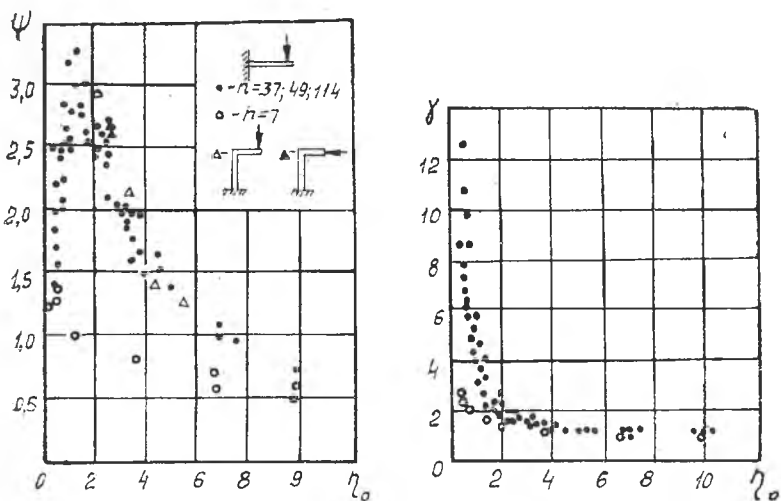


Рис. 5

оказывающие существенное влияние на УФХ, остаются неизвестными в процессе экспериментального исследования. В этом случае предлагаемый метод исследования упруго-фрикционных свойств будет неэффективным. Задача определения областей параметров, в которых применение теории подобия дает положительный результат, тесно связана с задачей определения свойств, общих для широкого круга систем конструкционного демпфирования или присущих отдельным классам этих систем. Классификация систем конструкционного демпфирования и указанные свойства этих систем изложены в [3].

## ВЫВОДЫ

1. В работе доказана эффективность исследования упруго-фрикционных свойств демпферов и амортизаторов на базе теории подобия.

Во всех исследованных случаях получен широкий ряд подобных по упруго-фрикционным свойствам типоразмеров изделия с большим диапазоном изменяемых параметров, удовлетворяющих широкому кругу практических требований и применений. Причем выполнение условий подобия не привело к снижению упруго-фрикционных свойств изделий, конструктивности и технологичности. Эти результаты показали целесообразность и возможность создания на базе общих закономерностей ряда типоразмеров демпферов и амортизаторов, подобных по упруго-фрикционным свойствам, что значительно облегчит кон-

кретное конструирование и экспериментальную проверку этих устройств при их практическом использовании.

Полученные результаты позволяют рекомендовать применение демпфирующих устройств с большим числом контактирующих элементов  $n$  (или большой относительной жесткостью

$r = \frac{C_0}{C_p}$ ,  $C_0$  — жесткость нерасслоенного устройства) не

только потому, что они обладают более высокими фрикционными качествами и более стабильными УФХ, но и потому, что в области асимптотического изменения зависимости  $\Psi(r)$  целый ряд безразмерных параметров не оказывает заметного влияния на УФХ, и в этой области значительно упрощается задача создания ряда типоразмеров, подобных по упруго-фрикционным свойствам.

2. Показано, что подобие по упруго-фрикционным свойствам различных типоразмеров изделия, осуществляющего сосредоточенное демпфирование, удобно исследовать путем сравнения полей упруго-гистерезисных петель, настроенных для одного и того же вида деформации в критериальных координатах  $\eta$ — $\xi$ , представляющих наиболее выгодные с точки зрения достижения наибольшей концентрации информации формы записи критериев подобия — безразмерной силы и безразмерного перемещения. Причем факт подобия устанавливается по наличию в этих координатах единственного для всех подобных типоразмеров поля упруго-гистерезисных петель. Даны рациональные способы определения базовых величин — обобщенной силы трения  $T$  и обобщенного перемещения  $a$  и, следовательно, наиболее выгодных форм записи критериев подобия  $\eta$  и  $\xi$ . Это позволило значительно упростить как аналитическое задание поля упруго-гистерезисных петель в критериальных координатах  $\eta$ — $\xi$ , так и задачу определения функциональных связей базовых величин с другими параметрами устройства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Эскин И. Д., Пономарев Ю. К. К вопросу подобия систем конструкционного демпфирования по упруго-фрикционным свойствам. В сб.: «Вопросы виброизоляции оборудования и приборов». Ульяновский политехнический институт, 1974.

2. Эскин И. Д., Пономарев Ю. К. Определение обобщенных упруго-фрикционных характеристик демпферов и амортизаторов с конструкционным демпфированием. Статья в настоящем сборнике.

3. Эскин И. Д. Исследование обобщенных упруго-фрикционных характеристик демпферов и амортизаторов авиационных двигателей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. КуАИ, Куйбышев, 1973.