

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ РАССЕЙЯНИЯ ЭНЕРГИИ В УСТРОЙСТВАХ КОНСТРУКЦИОННОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ

© 2006 М.А. Мальтеев, Г.Г. Карташов, В.А. Юдин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Попытки разных авторов напрямую использовать стандартное определение коэффициента поглощения для устройств конструкционного демпфирования привели к искажению заложенного в него изначально четкого физического смысла. Предлагается новый, физически обоснованный способ определения коэффициента поглощения для таких устройств.

В механических колебательных системах демпфирование принято оценивать коэффициентом поглощения энергии Ψ . Он определен стандартом [1] для линейной одномассовой системы, как отношение рассеиваемой за один период энергии гармонических колебаний к максимальной потенциальной энергии. Эта формулировка основана на определении, данном в более ранних работах Е.С. Сорокина [2,3] и Я.Г. Пановко [4] для свободных колебаний линейной системы со слабым затуханием.

Очевидно, что стандартное определение для таких систем является естественным, т. к. имеет конкретный физический смысл. При свободных колебаниях энергия извне в систему не подводится. Энергетическое состояние при слабом затухании характеризуется полной энергией, равной максимальной потенциальной энергии. Полная энергия W в течение одного периода уменьшается на величину работы сил неупругого сопротивления ΔW . Таким образом, коэффициент поглощения $\Psi = \Delta W/W$ характеризует в данном случае эффективность рассеяния относительно полной энергии системы. В этом смысле он аналогичен к.п.д. с учетом того, что работа сил трения является в данном случае полезной работой.

Развитие исследований в области демпфирования механических колебаний привело к созданию большого числа разнообразных устройств с мощной диссипацией за счет работы сил сухого трения. Они широко используются в технике для борьбы с вибрацией машин, узлов, агрегатов и отдельных деталей.

При исследовании устройств конструкционного демпфирования используется общепринятое положение о том, что пара-

метры рассеяния и упругости в демпферах сухого трения в широком диапазоне частот не зависят от скорости деформирования [4,5,6]. Это позволяет изучать их характеристики при статическом нагружении.

Диаграмма циклического нагружения демпфера в статике имеет вид петли гистерезиса, которая несет в себе полную информацию о его упругих и диссипативных свойствах. В частности, работа сил трения, т. е. рассеянная за цикл нагружения энергия эквивалентна площади петли ΔW .

На рис.1 показаны некоторые характерные формы петель различных устройств конструкционного демпфирования.

Для получения зависимости величины рассеянной за цикл нагружения энергии от амплитуды деформации снимают поле петель, задавая ряд значений амплитуды силы P_{ai} в интервале от нуля до максимальной эксплуатационной нагрузки P_{amax} (рис.1,б). Очевидно, что сравнение устройств по демпфирующей способности удобно проводить с помощью некоторого универсального безразмерного параметра, каковым должен являться коэффициент поглощения. Анализ известных публикаций показывает, что в вопросе о формулировке коэффициента поглощения применительно к рассматриваемым устройствам нет единого мнения. Авторы трактуют его по-разному, причем, отличие состоит в выборе энергетического параметра, сопоставляемого с рассеянной за период энергией.

В простейшем случае работу сил трения ΔW сравнивают с некоторой условной потенциальной энергией, найденной в предположении, что упругая характеристика линейна [1,3,4,5]. Вычисленная таким способом работа упругих сил W_l эквивалентна площади треугольника Oab на рис. 1 под

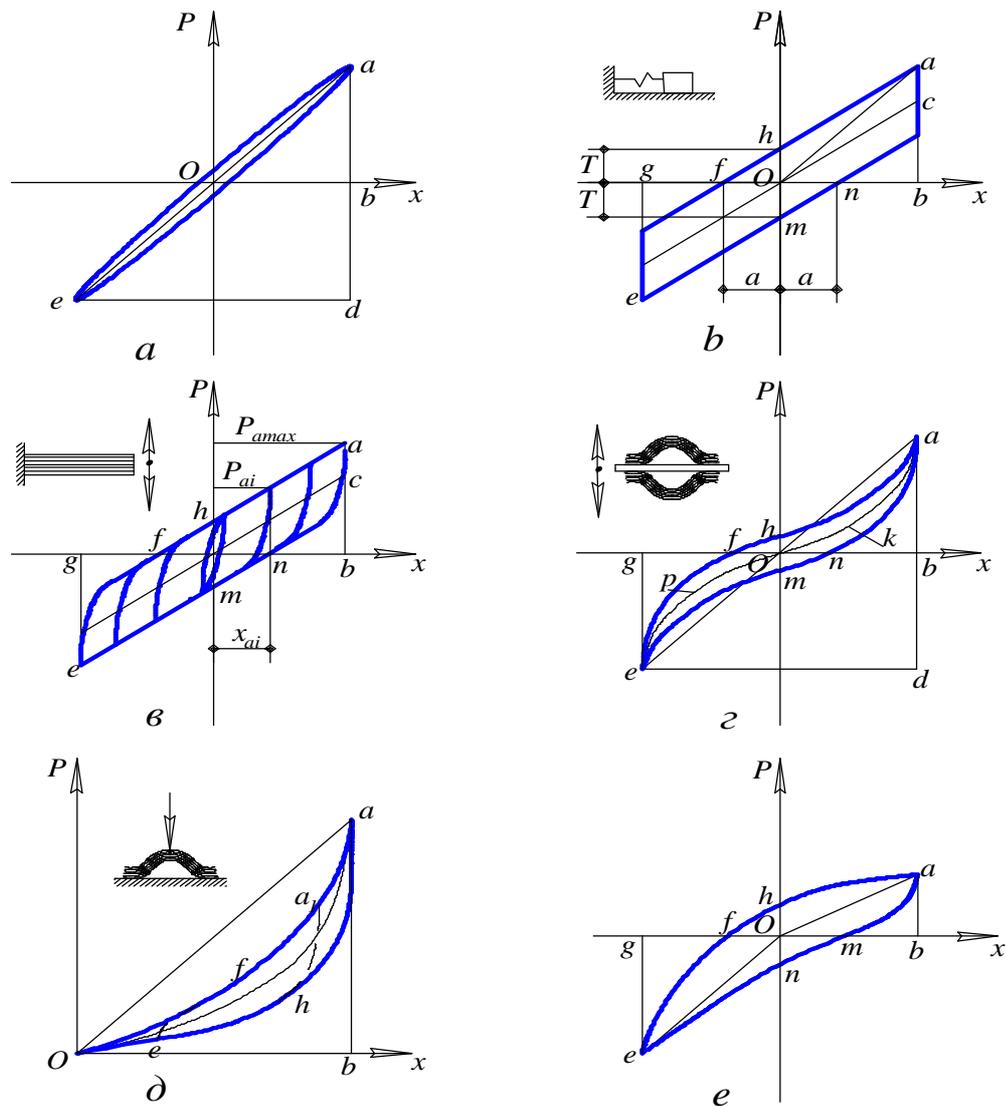


Рис.1. Эквивалентность работы упругих сил площади

секущей Oa , соединяющей начало координат с концом петли. Однако этот параметр не характеризует какое-либо реальное состояние нелинейной системы, и коэффициент $\Psi_1 = \Delta W / W_1$ оказывается лишенным изначального физического смысла. Кроме того, в силу аналогии с к.п.д. коэффициент поглощения не может быть больше единицы, тогда как отношение площади петли к площади треугольника Oab может быть значительно больше.

В работах [7,8] средняя линия петли, делящая пополам вертикальные отрезки между нагрузочной и разгрузочной ветвями (рис.1,з) принимается за упругую характеристику, а площадь петли относится к площади W_2 фигуры $Okab$ под средней линией Oka . В качестве обоснования приводится тот реальный факт, что во многих случаях не удается аналитически разделить в петле уп-

ругую и неупругую составляющие. В этом случае $\Psi_2 = \Delta W / W_2$.

Линия Oka может достаточно точно совпадать с реальной упругой характеристикой, полученной в предположении равенства нулю коэффициента трения. Тогда площадь $Okab$ действительно будет эквивалентна потенциальной энергии, накопленной в точке a . Однако это будет потенциальная энергия только верхнего полуцикла. В этом легко убедиться, рассмотрев процесс статического нагружения демпфера. Состояние в точках a и e обусловлено действием двух независимых внешних сил, равных по модулю и противоположных по направлению. Поэтому полная потенциальная энергия за цикл нагружения эквивалентна суммарной площади двух фигур $Okab$ и $Opeg$.

В работе [3] рассматриваются еще три варианта формулировки коэффициента по-

глощения. В первом площадь петли соотносится с площадью треугольника ade (рис.1,а), названной работой сил при полной деформации. Тогда $\Psi_3 = \Delta W / W_3$. Очевидно, что $\Psi_3 = \Psi_1 / 4$. Эта формулировка совпадает со стандартной [1] в том случае, когда положение ненагруженного состояния соответствует точке a или e . Иначе площадь ade не имеет смысла.

В качестве «более логичного» автором предложен другой вариант, выраженный зависимостью $\Psi_3' = \Delta W / 2W_3$, причем «логичность» обоснована тем, что в этом случае Ψ_3' не превышает единицы. Автор, видимо, пытался провести напрашивающуюся аналогию между Ψ и к.п.д., однако подошел к вопросу формально, учтя только половину площади петли.

Для упругой системы с кулоновым трением, когда проскальзывание происходит сразу по всей поверхности трения и график циклического нагружения имеет вид параллелограмма (рис.1,б), Е.С. Сорокиным предложен еще один вариант. В нем за потенциальную энергию принимается величина, определяемая формулой $W_4 = kx^2 / 2$. Здесь k – тангенс угла наклона средней линии Oc , параллельной линиям нагрузки и разгрузки, а x – амплитуда перемещения. Площадь треугольника Ocb точно соответствует потенциальной энергии упругой деформации при равенстве нулю коэффициента трения. В остальном эта формулировка не менее условна, чем предыдущие.

В работе [9] приводится еще одна формулировка Ψ . Она отличается от Ψ_3 тем, что эквивалент рассеянной энергии относится к площади W_5 фигуры $efhad$ (рис.1,з). Это определение дано без каких-либо комментариев, однако, несмотря на кажущуюся условность, позволяет прояснить картину вариации энергетического состояния при циклическом нагружении демпфера.

Если состояние статического равновесия соответствует точке e , а кривая eOa является упругой характеристикой, то энергетическое состояние в точке a соответствует потенциальной энергии упругой деформации (площадь фигуры $eOad$), накопленной под действием внешней силы. Часть работы

внешней силы (площадь $efhaO$) расходуется на трение на этапе нагрузки. Их сумма дает полную работу внешней силы на перемещении ed . На этапе разгрузки (линия $anme$) часть накопленной энергии расходуется на преодоление сил трения (площадь фигуры $anmeO$).

Таким образом, коэффициент поглощения показывает, какую часть полной работы внешней силы (полной энергии системы за цикл нагружения) составляет работа сил трения. Это справедливо только в рамках принятого допущения о положении центра равновесия в точке e . В случае равновесия в точке O площадь $efhad$ не имеет смысла.

Описанный способ справедлив для одностороннего цикла (рис.1,д), который получается, например, при циклическом сжатии многослойного гофрированного пакета металлических лент или втулочного виброизолятора из материала МР [7]. Здесь площадь фигуры $Ofab$ есть полная энергия за цикл нагружения.

В работе [10] предложен следующий способ приближенной оценки среднего значения Ψ для случая несимметричного двухстороннего гистерезисного цикла (рис.1,е или фигура efa_1h на рис.1,д):

$$\Psi_6 = \Psi_{CP} = (\Psi_B + \Psi_H) / 2,$$

$$\text{где } \Psi_B = \Delta W_B / (W_{1B} + 0,5\Delta W_B); \quad (1)$$

$$\Psi_H = \Delta W_H / (W_{1H} + 0,5\Delta W_H); \quad (2)$$

$\Delta W_B, \Delta W_H$ – работа рассеяния верхнего и нижнего полуциклов (площади частей петли над и под осью x);

W_B, W_H – условная энергия упругой деформации верхнего и нижнего полуциклов (площади треугольников Oab и Oeg).

Если секущие Oa и oe делят площади, соответственно, верхней и нижней полупетель пополам, то выражения в знаменателях формул (1) и (2) эквивалентны площадям $fhab$ и $tneg$, т.е. определяют полную энергию для верхнего и нижнего полуциклов. Тогда Ψ_B и Ψ_H показывают для каждого полуцикла, какая часть полной энергии пошла на рассеяние, а их полусумма определяет некоторую среднюю величину коэффициента поглощения.

Если петля симметрична, а секущая ea по-прежнему делит площади верхнего и нижнего полуциклов пополам, то коэффици-

ент поглощения, определяемый формулой $\Psi_6 = \Psi_{CP} = \Delta W / (W_1 + 0,5\Delta W)$, точно оценивает эффективность рассеяния относительно полной энергии, которая в данном случае эквивалентна площади фигуры *abnmeqfh* (рис.1,е). Однако факт деления пополам площади полуцикла секущей является исключением и, если он не имеет места (см., например, рис.1,з), то такое определение также неадекватно базовому по физическому смыслу.

Завершая анализ известных способов оценки рассеяния в устройствах конструкционного демпфирования, следует отметить, что их авторам не удалось выйти за рамки классической формулировки Ψ , данной для свободных колебаний линейной системы со слабым затуханием, обусловленным внутренним трением в материале. Предпринятые попытки формально распространить действие этой формулировки на системы конструкционного демпфирования привели к тому, что коэффициент поглощения оказался лишённым заложенного в него изначально физического смысла. Так в большинстве рассмотренных способов Ψ может принимать значения больше единицы, тогда как она должна быть его естественной верхней границей, соответствующей случаю полного рассеяния всей подведенной энергии.

Авторы пытались выделить в гистерезисном цикле некоторую условную потенциальную энергию и сопоставить ее с работой сил трения за цикл нагружения. При этом не учитывалось принципиальное отличие вариации энергетического состояния системы при статическом нагружении, вынужденных и свободных колебаниях.

В первых двух случаях отклонение в обе стороны от положения равновесия происходит под действием внешней вынуждающей силы, тогда как в третьем движение осуществляется без подвода энергии извне. Сопоставление рассеянной энергии с потенциальной при свободных колебаниях правомерно, так как в этом случае она равна полной энергии за период и определяется начальным отклонением.

Полная энергия при вынужденных колебаниях и в статике определяется работой внешней силы по перемещению в обе стороны от положения равновесия (в случае двухстороннего цикла). Часть этой работы

стороннего цикла). Часть этой работы расходуется на преодоление сил трения на прямом и обратном ходах. Таким образом, для этих двух случаев коэффициент поглощения должен быть определен как отношение рассеянной за цикл нагружения энергии к полной механической энергии системы. В этом варианте он сохраняет физический смысл базового определения, характеризуя эффективность рассеяния относительно полной энергии, и аналогичен к.п.д.

Геометрической интерпретацией полной механической энергии W_{II} на диаграмме циклического нагружения является площадь фигуры *abnmeqfh* на рис.1,б,в,г,е. Для одностороннего цикла это будет площадь *Ofab* (рис.1,д).

Сопоставление результатов экспериментального определения коэффициента поглощения всеми описанными способами показано на рис.2. Испытывались серийные образцы упруго-демпфирующих опор для трубопроводов диаметром 8, 12, 14 и 17мм. Конструкция опоры показана на рис.2. Она состоит из двух многослойных пакетов стальных лент, охватывающих трубопровод. Необходимое удельное давление в пакете создается пружинной скобой, прижимающей пакеты к трубопроводу и специальной профилировкой лент в пакете. Тонкостенная разрезная втулка между пакетами и трубопроводом предохраняет поверхность трубопровода от износа.

На графиках показаны зависимости коэффициента поглощения от безразмерной силы $\eta = P_{ai}/T$, где P_{ai} – амплитуда силы каждой петли внутри поля, а T – обобщенная сила трения (рис.1). Видно, что сравнение по демпфирующей способности, определенной различными способами, невозможно. В связи с этим представляется целесообразным использовать для оценки демпфирующей способности демпферов сухого трения коэффициент поглощения в виде:

$$\Psi = \Delta W / W_{II},$$

где W_{II} – полная механическая энергия за цикл нагружения.

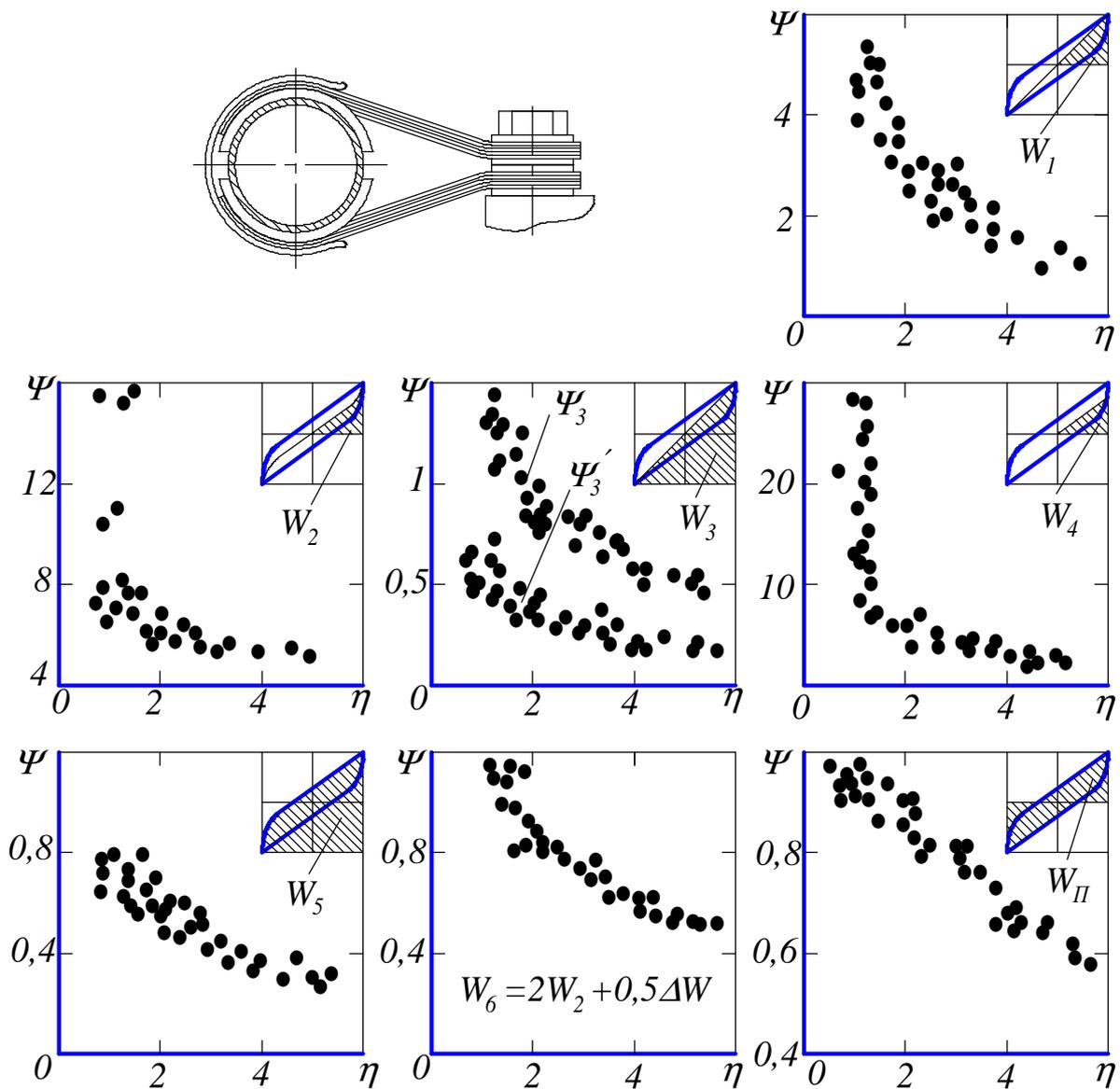


Рис.2. Сопоставление результатов эксперимента

По физическому смыслу эта формулировка аналогична стандартной, т.к. указывает, какая часть подведенной энергии расходуется на трение. Область применения критерия – оценка рассеяния в системах с конструкционным демпфированием.

Список литературы

1. ГОСТ 24346–80. Вибрация. Термины и определения. Введ. 01.01.81.– М.: Изд-во стандартов, 1980.–31 с.
2. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. – М.: Госстройиздат, 1960. – 132 с.
3. Сорокин Е.С. Коэффициент диссипации энергии колебаний жестких тел при действии внутренних и внешних сопротив-

лений/ Труды научно–техн. совещания по изучению рассеяния энергии при колебаниях упругих тел. – Киев: Изд-во АН УССР, 1958.– С. 128–157.

4. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. – М.: Физматгиз, 1960.– 196 с.

5. Конструкционное демпфирование в неподвижных соединениях/ Н.Г. Калинина, Ю.А. Лебедев, В.И. Лебедева и др.– Рига: Изд-во АН Латвийской ССР, 1960.– 172 с.

6. Кузьмин Э.Н., Егоров Г.Я. Исследование динамических характеристик втулочных амортизаторов/ Вибрац. прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Межвузовский сб.– Куйбышев, 1975.– С 54–59.

7. Бузицкий В.Н., Тройников А.А. Расчет втулочных амортизаторов из материала МР, работающего на сжатие/ Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Межвуз. сб.– Куйбышев, 1976.– С. 15–21.

8. Скородумов Б.А. Алгоритм учета гистерезисных потерь при исследовании нестационарных колебаний нелинейных систем/ Теория мех–мов и машин.– Харьков, 1975.– С. 9–13.

9. Кошечев А.А., Туркевич А.А., Чеглаков В.А. Устройство для автоматического измерения характеристик петли гистерезиса/ Рассеяние энергии при колебаниях механических систем.– Киев: Наукова думка, 1974.– С. 185–193.

10. Конструкционное демпфирование в узлах вибрационных машин/ М.В. Хвингия и др.– Тбилиси: ГПТИ, 1973.– 140 с.

ANALYSIS OF METHODS OF EVALUATION OF ENERGY DISPERSION IN CONSTRUCTIVE DAMPING DEVICES

© 2006 M.A. Malyteev, G.G. Kartashov, V.A. Yudin

Attempts of different authors to use standard definition of dispersion coefficient for constructive damping devices directly led to distortion of it's strong physical sense. A new physical proved way of definition of dispersion coefficient for such devices is introduced.