

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)

Д.К. НОВИКОВ, Д.С. ДИЛИГЕНСКИЙ

АНАЛИЗ ДЕМПФИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА

Рекомендовано редакционно-издательской комиссией института двигателей
и энергетических установок в качестве электронного учебного пособия

САМАРА
2017

УДК 629.7.036

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация авиационной техники»
И. П. Канунников

Новиков, Дмитрий Константинович

Анализ демпфирующих характеристик упругого элемента: электрон. учебное пособие / *Д. С. Дилигенский, Д. К. Новиков.* – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – Электрон. и граф. дан. (16,6 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Электронное учебное пособие представляет собой методическое указание по проведению лабораторной работы «Анализ демпфирующих характеристик упругого элемента».

Учебное пособие предназначено для магистров, специалистов и бакалавров специальностей 24.04.05, 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов», 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», 25.03.01 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» и 13.03.03 «Энергетическое машиностроение».

Электронное учебное пособие разработано на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского университета.

УДК 629.7.036

Оглавление

1. Цель работы.....	4
2. Введение.....	4
3. Что такое петля гистерезиса, что такое коэффициент рассеивания.....	5
4. Описание установки для проведения лабораторной работы.....	7
5. Подготовка к измерениям.....	10
6. Подготовка материала МР и установки.....	11
7. Порядок проведения эксперимента для амортизатора типа «Колокольчик».....	13
8. Обработка результатов эксперимента.....	13
Заключение.....	16
Список используемой литературы.....	17

1 Цель работы

Цель лабораторной работы – познакомить студентов с методикой анализа упругодемпфирующих свойств различных образцов, получения упругой петли гистерезиса и коэффициента рассеивания.

2 Введение

Работа двигателя всегда сопровождается различными и вибрационными явлениями. Высокие уровни шума и в особенности вибрации являются отрицательными показателями качества двигателей. Поэтому затрачивается много усилий и средств на то, чтобы свести вибрации и шум к минимуму. Основным источником вибраций ГТД является роторы. Взаимодействие роторов в многовальных двигателях и иных систем с упругой системой корпусов и подвески двигателей порождает многочисленные резонансные явления, при которых уровень вибраций резко возрастает, возникает упругодинамическая неустойчивость всей системы двигателя, приводящая к различным дефектам, сокращающим срок эксплуатации либо выводящим двигатель из строя окончательно [1].

Для снижения общего уровня опасной вибраций роторов и всего двигателя в целом и устранения резонансных колебаний, в опоры ротора устанавливаются демпферы. Они позволяют снизить уровень опасных вибраций, за счет рассеяния энергии колебаний. Существует множество различных вариантов демпферов, в которых применяют как механические способы поглощения энергии вибрации, так и гидродинамические, а иногда и оба сразу.

В ГТД нашли применение два типа демпферов:

- гидравлические, которые используют силы вязкого трения;
- сухого трения.

Гидравлические в свою очередь подразделяются на дроссельные и гидродинамические. У дроссельных демпферов демпфирующая сила

возникает за счет передавливания жидкости через какие либо ограничители расхода. У гидродинамических - при перетекании жидкости по тонкому демпферному зазору [2].

Демпферы сухого трения могут быть выполнены из гладких или гофрированных лент, из тросов или специального материала – металлической резины (МР), который был изобретен на кафедре КиПДЛА в шестидесятые годы прошлого века [3]. Он представляет собой спираль, навитую из тонкой (0,1...05 мм) металлической проволоки. Эта спираль укладывается определенным образом и прессуется. В результате получают втулки или шайбы (рисунок 1,а), обладающие упруго-демпфирующими свойствами. Такие детали могут работать только на сжатие.

Материал МР может быть использован как основа для конструкции специальных демпферов, например, «колокольчик» (рисунок 1,б). Такой демпфер может работать не только на сжатие, но и на растяжение. На рисунке 1, в представлен демпфер, выполненный из троса.

Важной характеристикой демпфера сухого трения является петля гистерезиса. Это зависимость усилия, возникающего в демпфере, от перемещения при нагрузке-разгрузке.

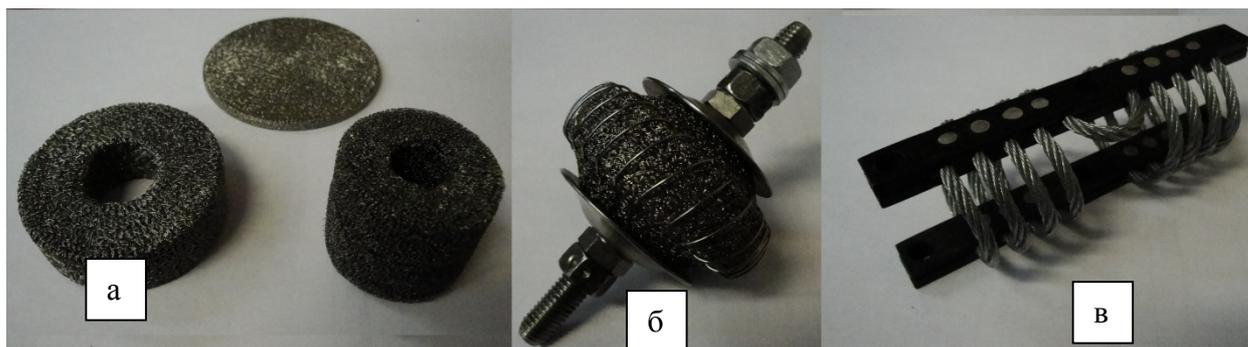


Рисунок 1. - Возможные образцы для исследования: а) упругий элемент из МР - "шайба", б) упругий элемент типа "колокольчик", в) тросовый упругий элемент

3 Что такое петля гистерезиса, что такое коэффициент рассеивания

При циклическом деформировании упругих тел, даже при малых напряжениях наблюдается некоторое нарушение закона Гука, выражающееся

в появлении петли гистерезиса; на рисунке 2 показана такая петля в координатных осях напряжение – σ , деформация - ε для материала с линейными характеристиками.

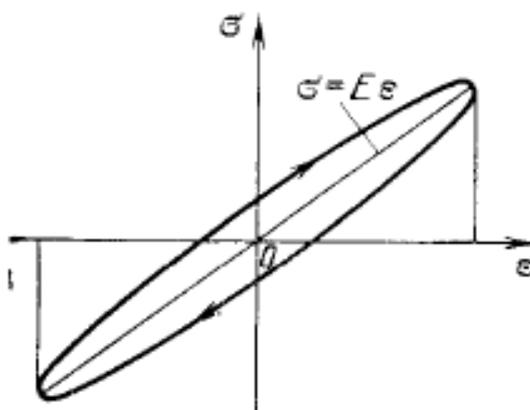


Рисунок 2. - Петля Гистерезиса

Расположенная внутри петли гистерезиса площадь диаграммы определяет энергию, рассеиваемую за один цикл колебаний в единице объема материала. Так как расстояния между ветвями обычно весьма малы, точную форму петли в экспериментах установить затруднительно. В то же время площадь петли может быть определена достаточно надежно. Установлено, что площадь петли гистерезиса для большинства конструкционных материалов практически не зависит от темпа деформирования (т. е. от частоты процесса), но зависит от амплитуды деформации.

Сказанное справедливо и по отношению к целой конструкции: рассеиваемая за один цикл в конструкции энергия ΔW не зависит от частоты колебаний, но связана с их амплитудой. Эта зависимость обычно принимается в форме:

$$\Delta W = \Psi W ,$$

где Ψ - коэффициент поглощения энергии.

Обычно с помощью петель гистерезиса находят весьма важные интегральные и дифференциальные характеристики систем конструкционного демпфирования (СКД):

- рассеянная за цикл энергия, равная площади петли гистерезиса ΔW ;

- статическая жесткость, жесткость системы без проскальзывания элементов, динамическая жесткость;

- коэффициент поглощения энергии $\Psi = \frac{\Delta W}{W}$, равный отношению рассеянной энергии ΔW к амплитуде подведенной потенциальной энергии W и др.

Вышеуказанные характеристики являются определяющими при изучении колебаний механических систем с конструкционным гистерезисом, имеющих одну степень свободы. В таких системах коэффициент поглощения характеризует способность механической системы рассеивать энергию колебаний, иначе говоря, ее демпфирующую способность. Поэтому коэффициент поглощения Ψ часто называют коэффициентом рассеяния энергии колебаний.

4 Описание установки для проведения лабораторной работы

Для получения вышеописанных параметров для исследуемых нами элементов (рисунок 1,а,б) воспользуемся лабораторной установкой, представленной на рисунке 3.

Установка позволяет нагрузить демпфирующий элемент заданной силой и измерить возникающее при этом перемещение. Она представляет собой неподвижное основание (3,а) со стойкой (3,в) и рейкой, жестко зафиксированной вдоль оси стойки, и подвижной жесткой подвижной платформы (3,б), консольно закрепленной на стойке с рейкой и приводимой в движение с помощью ручки (3,г).

На установке смонтирован тензодатчик (3,д), рассчитанный на максимальную нагрузку до **50 кг** (в обе стороны - на растяжение и на сжатие). Информация с датчика отображается на индикаторе тензометра (3,е).

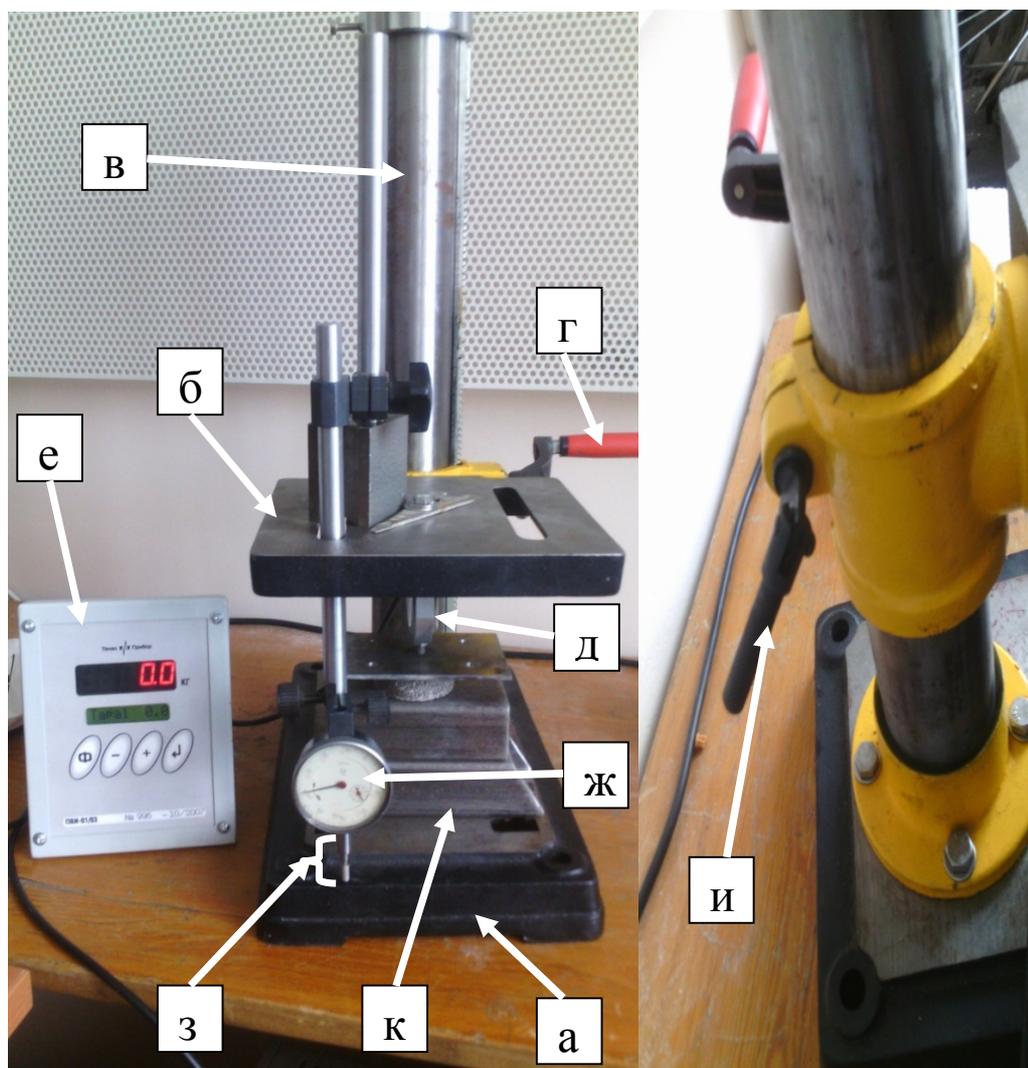


Рисунок 3. - лабораторная установка: а) - неподвижная опора, б) - подвижная опора, в) – стойка с рейкой, г) - ручка регулировки, д) - тензодатчик, е) - тензометр, ж) - индикатор часового типа, з) - стержень индикатора, и) - рычаг затяжки подвижной платформы

Положение подвижной платформы фиксируется рычагом затяжки позади стойки (з,и). Усилие на амортизатор создается при вращении ручки (з,г) и измеряется индикатором (з,е), а соответствующее этому усилию перемещение определяется по индикатору часового типа (з,ж).

Для демпфера типа "колокольчик" так же имеется дополнительная оснастка (рисунок 4). Для обычных образцов типа втулки или шайбы (рисунок 1,а) достаточно установить одну или несколько плоских пластин, в которые можно вертикально упереть стержень индикатора и жесткой рамы (рисунок 4,г), что бы для индикатора хватало места. В случае проскакивания

ручки при работе необходимо поднять платформу выше, очистить рейку тканью, смазать ее и подкрутить задний рычаг регулирования натяга подвижной платформы (рисунок 3,и). Так же для определения деформации образца на установке необходимо закрепить индикатор часового приблизительно так, как показано на рисунке 7.

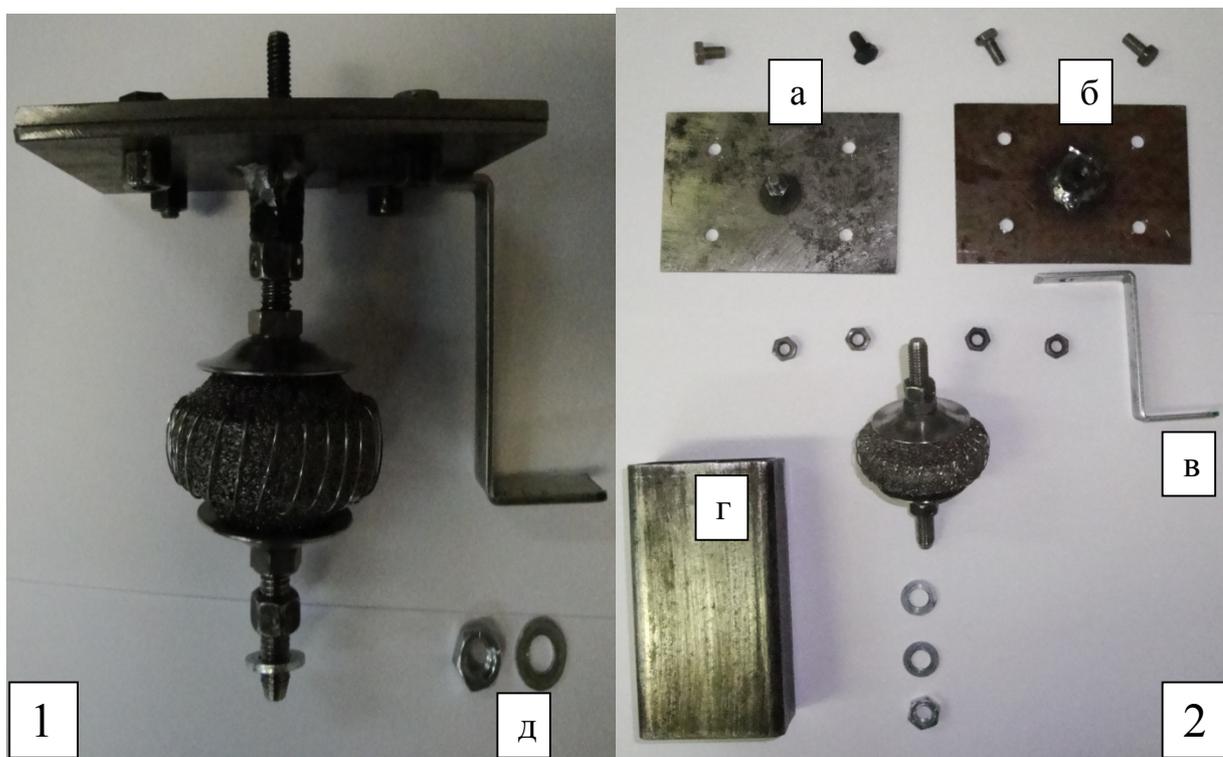


Рисунок 4. - Оснастка для элемента "колокольчик":

1) - в собранном виде, 2) - в разобранном

На рисунке 5 представлены петли гистерезиса, снятые на установке GALDABINI в лаборатории ОНИЛ-1 для образца "а" (рисунок 1). Таким образом, в дальнейшем полученные графики должны качественно приближаться к показаниям, приведенным на рисунке 5. Необходимо так же учесть, что программа на GALDABINI имеет нестандартную систему отсчета, считая положительным направлением разгрузку, а не нагрузку, из-за чего петля выглядит зеркально.

5 Подготовка к измерениям

Для анализа демпфера типа "колокольчик" необходимо следовать следующей последовательности шагов:

- соединить две плоские пластины (рисунок 4 - а и б).
- соединить пластины с Г-образной деталью (рисунок 4,в).
- завинтить колокольчик в собранную пластину до упора.
- с обратной стороны пластины на резьбу установить контровочную гайку, как показано на рисунке 4.1, с помощью нее в последующем можно задать дополнительный натяг
- завернуть колокольчик вместе с пластинами в тензомер, но не до упора, после чего затянуть на нем контровочную гайку.
- наклонить установку и закрепить (но не плотно) короб (рисунок 3,к) на платформу (рисунок 3,а).
- поставить установку обратно в вертикальное положение
- включить тензомер в сеть и выставите его на ноль. Для этого нажать левую кнопку "Ф" пока не появится надпись «нуль веса» и нажать ввод " ← ", после чего на индикаторе значение должно сброситься до нуля.
- начать опускать платформу; когда "колокольчик" опустится достаточно низко - пододвинуть короб так, чтобы "колокольчик" своей резьбой плавно проходил в отверстие на коробе
- снова положить установку на бок и плотно привернуть короб к установке
- навернуть одну гайку на свободную резьбу "колокольчика"
- надеть на резьбу шайбу и, удерживая ее рукой, опустить платформу на половину длины резьбы в отверстие
- теперь необходимо на ощупь надеть на резьбу внутри короба (рисунок 3,к) шайбу и гайку (рисунок 4,д) и завернуть последнюю, но не сильно

- проверить, что верхняя и нижняя часть "колокольчика" установлены на одной оси, если нет, необходимо положить установку на бок и, ослабив болты, передвинуть короб

- завернуть гайки так, чтобы на индикаторе тензомера значение упало до 0 ± 0.2 кг. Если разница слишком большая, можно регулировать высоту положения платформы рычагом рисунок 3,г.

- индикатор необходимо установить на нижней платформе, как показано на рисунке 7.

- подвести измерительный стержень индикатора к платформе

- необходимо установить индикатор так, чтобы стержень был строго перпендикулярен поверхности пластины и наполовину сжат, так как измерения необходимо будет провести как на сжатие, так и на растяжение

- теперь установка готова к исследованию - рисунок 6.

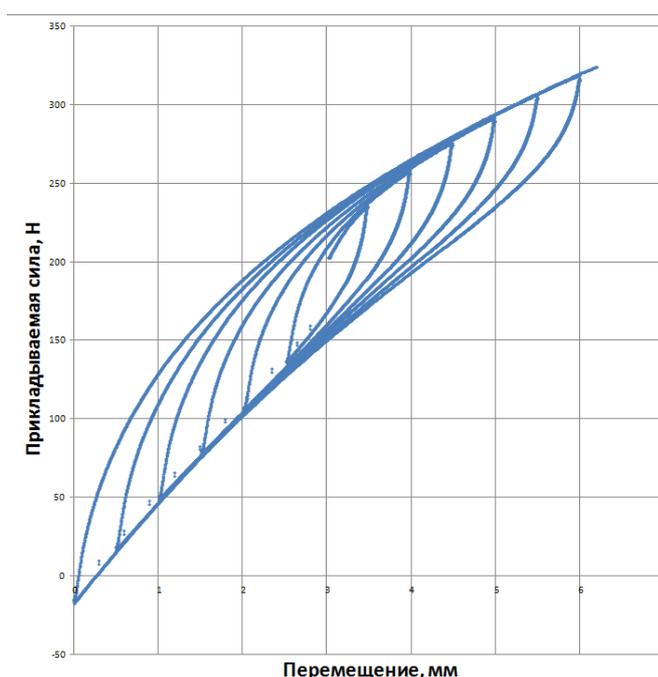


Рисунок 5. - Петля гистерезиса элемента "шайба" (рисунок 1,а)

6 Подготовка материала МР и установки

Материал МР в отличие от известных материалов имеет период тренировки, так как его структура неоднородна. Другими словами, есть несколько циклов нагружения, во время которых характеристики образца

будут изменяться до определенного постоянного значения. Чтобы подготовить материал, его необходимо плавно нагрузить и разгрузить 8-15 раз подряд. Если не сделать этого шага, то получаемые петли гистерезиса будут смещены друг относительно друга. После отстройки можно начинать измерения.



Рисунок 6. - Лабораторная установка с собранной оснасткой для анализа элемента "колокольчик"

Важно, чтобы платформа хорошо держала натяг в обе стороны. Преждевременное снятие нагрузки приведет к большой погрешности измерений. Снятие характеризуется разгрузочным люфтом, это можно заметить по значению на тензомере, когда оно сильно изменяется, если отпустить рычаг при нагружении. Платформа должна ходить с трудом, при необходимости нужно попросить у проводящего лабораторную работу преподавателя смазочное средство.

7 Порядок проведения эксперимента для амортизатора типа «Колокольчик»

1. После проведения тренировочных циклов для выравнивания характеристик МР можно переходить непосредственно к определению значений для петли гистерезиса.

2. Данные необходимо занести в таблицу для последующей обработки машинными средствами (Excel, Mathcad и пр.)

3. При анализе элементов из МР, положительной нагрузкой принято считать направление сжатия, тензомер в этом случае показывает отрицательные значения.

3 Нагружение и разгружение контролировать через значения на индикаторе, так как значение тензометра корректируется, когда испытатель убирает руку с рычага подвижной платформы.

4 Количество промежуточных шагов неограниченно, но рекомендуется делать шаги в 0.05-0.2 мм. Для простоты обработки.

5 Проводите измерения по одним и тем же значениям перемещения. То есть, если при нагружении вы отметили точки (0.25, 0.5, 0.75...)мм, то при разгрузке необходимо так же идти по точкам (...0.75, 0.5, 0.25)мм.

8 Обработка результатов эксперимента

Результаты эксперимента занести в таблицу 1. Обратите внимание, что указаны только конечные участки циклов, количество точек в промежутках (отмечено многоточием - ...) произвольно, но при этом необходимо соблюдать правило §7,п.5.

1) По данным таблицы 1 построить петлю гистерезиса (рисунок 7)

2) Система с материалом МР является нелинейной. Это значит, что если провести анализ одного и того же образца, но с разной амплитудой нагружения, то полученные значения коэффициентов рассеяния будут отличаться. Разбейтесь на 4 группы и посчитайте

величину Ψ (к.рассеяния) отдельно для 4 амплитуд "А" (рисунок 9,а,б,в,г). Постройте зависимость $\Psi(A)$.

Таблица 1. - Пример результатов измерений для амортизатора типа «колокольчик»

Цикл №1	Сила, Н	500	400	340	...	-280	-300	-235	...	487	500
	Перемещение, мм*0.01	-300	-280	-260	...	480	500	480	...	-280	-300
Цикл №2	Сила, Н	400	300	235	...	-235	-250	-180	...	380	400
	Перемещение, мм*0.01	-220	-200	-180	...	380	400	380	...	-180	-220
Цикл №3	Сила, Н	300	220	140	...	-180	-200	-140	...	275	300
	Перемещение, мм*0.01	-140	-120	-100	...	280	300	280	...	-120	-140
Цикл №4	Сила, Н	200	120	55	...	-130	-150	-80	...	175	200
	Перемещение, мм*0.01	-60	-40	-20	...	180	200	180	...	-40	-60

3) Коэффициент рассеяния считается по формуле $\Psi = \frac{\Delta W}{W}$, где ΔW – рассеянная за цикл энергия. ΔW численно равна площади внутри петли. Для определения величины W воспользуйтесь ранее построенным графиком петли и методом средних прямоугольников.

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=0}^{n-1} f\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2}\right) (x_{i+1} - x_i) = \sum_{i=1}^n f\left(\frac{x_{i-1} + x_i}{2}\right) (x_i - x_{i-1}).$$

W численно равна площади под средней линией, как если бы петля начиналась из точки с координатами [0;0]. Области ΔW , W и средняя линия отмечены на рисунке 8.

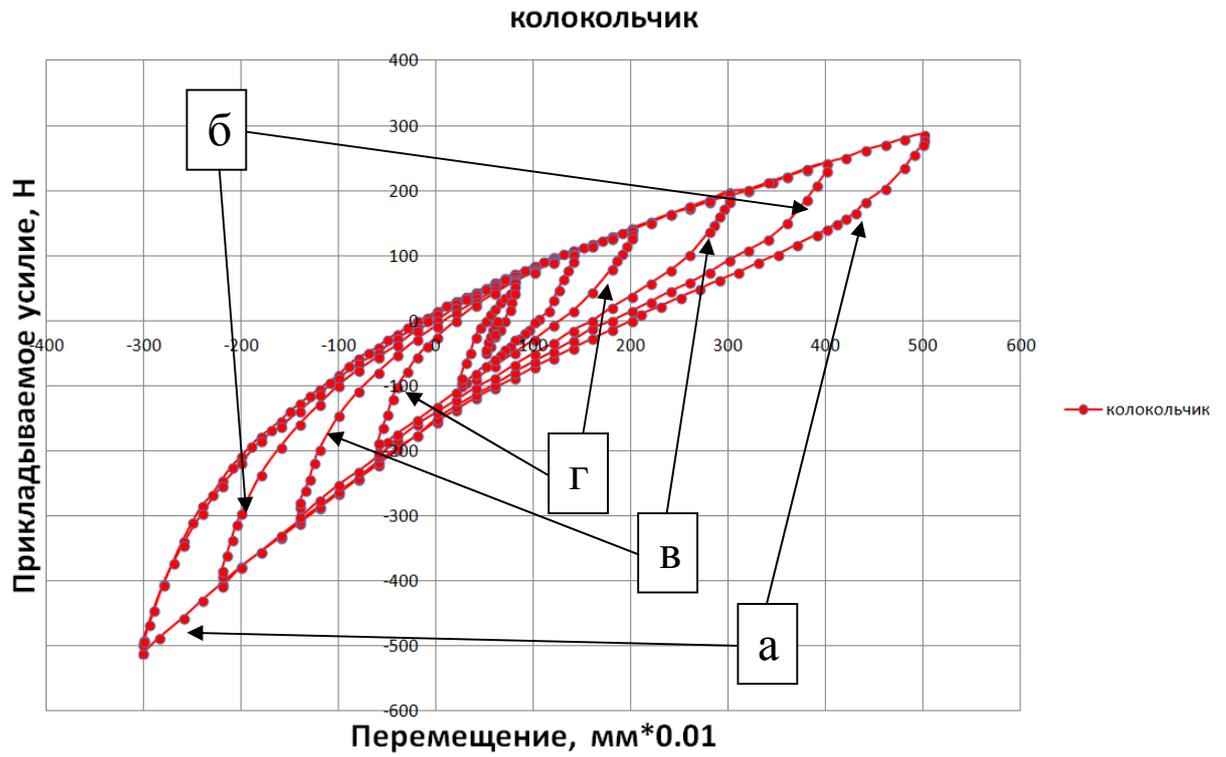


Рисунок 7. - Петля гистерезиса для образца «колокольчик»

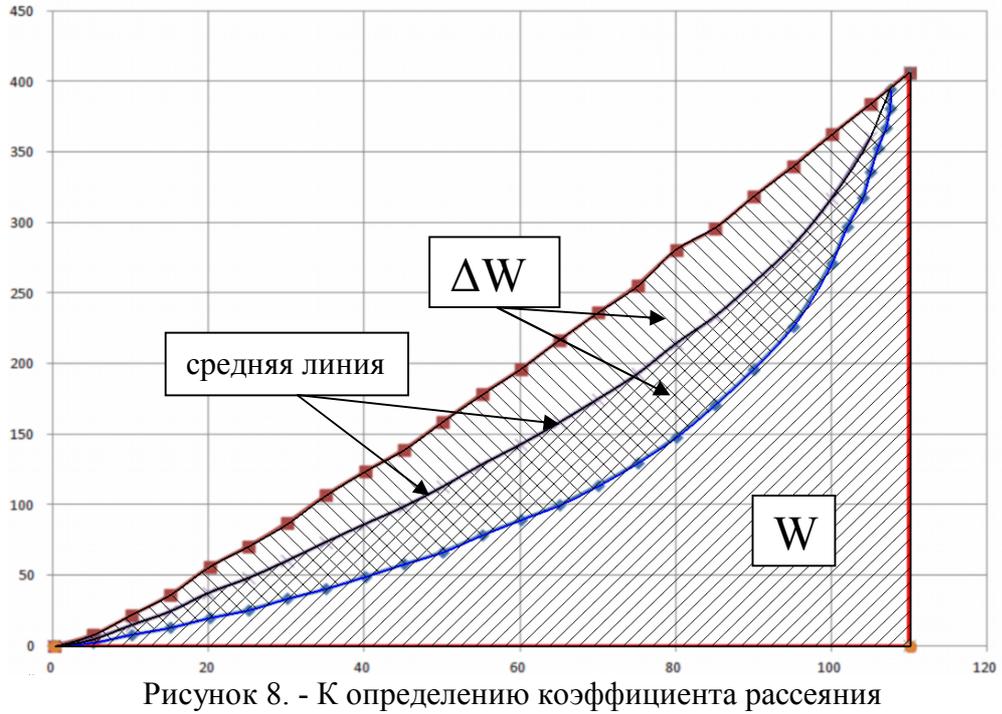


Рисунок 8. - К определению коэффициента рассеяния

Заключение

В электронном учебном пособии рассмотрены вопросы влияния демпфирования на вибрацию машин. Особое внимание уделено конструкции демпферов и экспериментальному определению их упруго-фрикционных характеристик. Описана конструкция экспериментальной установки, а также порядок проведения и обработки результатов эксперимента. В результате выполнения этой работы студент может построить петлю гистерезиса исследуемого демпфера и определить коэффициент рассеяния.

Список используемой литературы:

1. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей : учебник для вузов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» / [С. А. Вьюнов, Ю. И. Гусев, А. В. Карпов, А. Е. Ковалевская, Ю. М. Никитин, А. А. Саркисов, Н. М. Споригина, К. Р. Хачатуров, Д. В. Хронин] ; под ред. Д. В. Хронины. – Москва : Издательство «Машиностроение», 1989. – 368 с.
2. Белоусов А. И. Гидродинамические демпферы опор роторов турбомашин : учебное пособие / А. И. Белоусов, Д. К. Новиков, В. Б. Балякин. – Самара : Куйбышевский авиационный институт, 1991. – 95 с.
3. Пат. SU136608, МПК: F16F 7/12 Упругий элемент для систем демпфирования / Сойфер А. М., Бузицкий В. Н., Першин В. А. ; заявл. 27.07.1960 ; опубл. 1961, Бюл. № 5, ЦБТИ, Москва. – 2 с.
4. Лазуткин Г. В. Динамика виброзащитных систем с конструкционным демпфированием и разработка виброизоляторов из проволочного материала МР : монография / Г. В. Лазуткин. – Самара : СамГУПС, 2010. – 304 с.
5. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний : учеб. пособие / Я. Г. Пановко. – Л. : Наука, 1989. – 252 с.