

MODELLING ALL-METAL FILTERS FOR DIFFERENT PURPOSES WITH ELASTIC ELEMENT IN THE FORM OF A CABLE

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ В ВИДЕ ТРОСА

Prof. Dr. Eng. Ponomarev U.¹, Prof. Dr. Eng. Ermakov A.², Ass. Prof. Melentjev V.³,
Ass. Prof. Gvozdev A.⁴, Eng. Vasjukov E.⁵
State Aerospace University, Samara, Russia^{1,2,3,4}; Machine-building factory, Briansk, Russia⁵

Abstract: The objective of work consist in development of mathematical model of parametrical lines of all-metal filters with elastic elements of regular structure. In the given work the mathematical model develops with reference to a subset cable all-metal filters. For verification of the developed model a series of experiments with two parametrical lines cable all-metal filters the different design has been carried out

KEYWORDS: CABLE ALL-METAL FILTER, DAMPING, EXPERIMENT, MATHEMATICAL MODEL, VIBRATION, VIBRATION ISOLATOR

1. Введение

Основными преимуществами тросовых виброизоляторов являются: высокая прочность, способность работать в экстремальных условиях, высокий коэффициент рассеивания энергии, низкая себестоимость и простота конструкции, стабильность работы и эффективность при защите от ударных нагрузок.

На основании анализа патентов, зарегистрированных в различных странах¹, существующие на данный момент цельнометаллические тросовые виброизоляторы можно разделить по назначению на три большие группы:

- А) Применяемые для изоляции одного объекта от другого (чаще всего аппаратуры от основания)²
- В) Применяемые для выборочной передачи нагрузок в соединениях (чаще всего крутящего момента в соединениях валов)³
- С) Применяемые для поглощения энергии кратковременных ударов⁴.

Весьма разнообразные конструктивно, тросовые виброизоляторы также можно разделить на несколько групп: I. Самая широко распространённая конструкция предполагает наличие двух или более разъёмных пластин, между которыми укладывается «змейкой» и зажимается цельный отрезок троса (см. рис. 1). В основном, виброизоляторы подобной конструкции относятся к группе А.

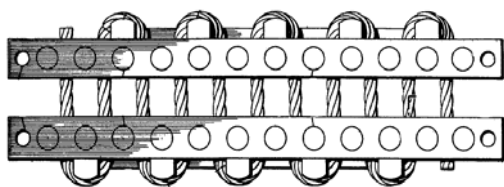


Рис. 1 – Вариант конструкции типа I.

Одна пластина крепится на объекте виброзащиты, другая на основании. Для устойчивости в конструкции используются несколько, симметрично расположенных виброизоляторов.

Дальнейшее совершенствование таких конструкций направлено на:

- 1) Повышение ресурса, например, за счёт установки троса в резиновые втулки или профилирования тросодержащих элементов. В частности, вместо пластин могут быть использованы наборы стянутых в пакет гофрированных металлических лент и так далее;
 - 2) Оптимизацию несущих свойств за счёт изменения формы пластин⁵, количества или комбинации нескольких виброизоляторов в одной конструкции, обеспечивающей объёмное (по трем координатным осям) демпфирование.
- II. Вторая конструкции также предполагает две разъёмные пластины, однако в данном случае трос навивается в виде спирали (см. рис. 2).

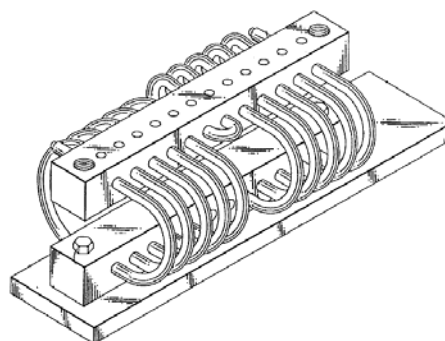


Рис. 2 – Вариант конструкции типа II.

Здесь возможно большое число вариаций [4]. Например, витки спирали могут иметь разный наклон, диаметр или же спиралью может быть несколько. Данная конструкция чаще всего относится к группе А.

III. Третья конструкция встречается как в группе А⁶, так и в В⁷. Это так называемые виброизоляторы колокольчикового типа. Широко используются две конструкции (см. рис. 3 а) и б)). В обеих есть верхняя и нижняя обоймы, находящиеся на одной оси. В первом случае, они соединены симметрично расположенными по окружности отрезками троса, так что точки входа и выхода троса лежат в одной плоскости. А во

¹ Обзор проводился преимущественно по патентным базам России, Германии и США, а также Швейцарии, Японии, Франции, Испании и Италии.

² Например, патенты CH405832A (Швейцария), RU2082038C1, RU2199683C2 (Россия), US3037728A1, US3039725A1 (США), DE19947794A1 (Германия) и другие.

³ Например, патенты GB328021A (Великобритания), US732079A1, US1602912A1, US1657844A1, US1672398A1 (США) и другие.

⁴ Например, патенты US3086600A1, US5897093A1, US5690322A1 (США) и другие.

⁵ Например, изготовление пластины в виде сектора цилиндрической оболочки, как в патентах US3037728A1 и US2972459A1 (США), позволяет изменить форму упругой линии троса.

⁶ Патенты RU2199683C2, RU2082038C1 (Россия), DE20204928UU1 (Германия), в этом случае верхняя обойма крепится к грузу, а нижняя к основанию.

⁷ Патент US1602912A1 (США), здесь одна обойма крепится к одному валу, другая – к другому. По работе система напоминает универсальный шарнир или шарнир Гука, но с демпфированием [6].

втором обоймы повернуты на некоторый угол, чаще всего 90 градусов.

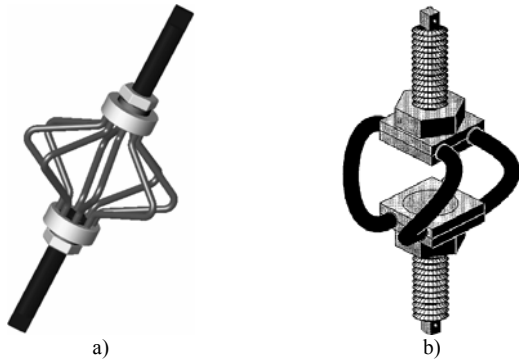


Рис. 3 – Варианты конструкции типа III.

IV. Среди прочих конструкций группы В следует выделить два типа:

- Прямое соединения;
- С центральным звеном.

Простейшей конструкцией с прямым соединением являются утолщения на концах валов, на которых по окружности размещаются болты, а затем последовательно навивается трос. Более сложные конструкции предполагают отсутствие контакта валов, поскольку на концы валов одеваются специальные переходники, которые соединены между собой

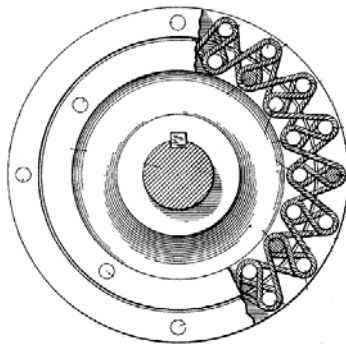


Рис. 4 – Вариант конструкции типа IV.

целыми пакетами деталей, включающими трос или отрезки троса в качестве упруго элемента. В частности, в состав пакетов могут входить и элементы типа I⁸.

Конструкции с центральным звеном отличаются ещё большей сложностью, поскольку между насадками размещается промежуточный элемент, удерживаемый лишь тросом. Его назначение – формирование нужной формы упругой линии и дополнительное натяжение троса. Причём форма упругой линии может задаваться весьма сложной, например спиральной⁹.

Общий анализ конструкций групп А и В показывает, что наибольшее распространение получили самые простые виды виброизоляторов типа I, II и III, поскольку усложнение конструкции в данном случае редко вызывает сопоставимое повышение эффективности виброзащиты, при резком снижении надёжности работы. В то время как добиться требуемого уровня виброзащиты можно, комбинируя в одной системе несколько виброизоляторов простой конструкции.

Также достаточно эффективны гибридные виброизоляторы, использующие в качестве упруго-демпфирующего элемента сочетания троса с упругими

лентами, проволокой, металлическим аналогом резины (МР). Однако они не принадлежат к собственно тросовым виброизоляторам и далее в статье рассматриваться не будут. V. Элементы группы С отличаются тем, что в них демпфирование собственно троса отходит на второй план, а на первый выдвигается способность выдерживать колоссальные нагрузки, возникающие при ударе. При этом линии троса работают не только на изгиб, но и на растяжение.

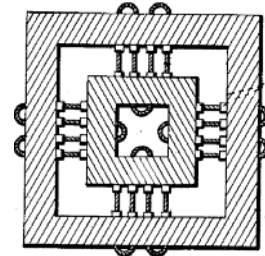


Рис. 5 – Вариант конструкции типа V.

В данной работе проводится анализ тросовых виброизоляторов, по условиям нагружения работающих в группах А и частично в В. Виброизоляторы группы С не рассматриваются в силу специфичности условий нагружения. В качестве примера выбрана относительно простая конструкция типа III.

2. Предпосылки и средства для решения проблемы

Главная цель настоящей работы заключалась в разработке математической модели параметрических рядов виброизоляторов с упругодемпфирующими элементами регулярной структуры. В данной работе математическая модель развивалась применительно к подмножеству тросовых виброизоляторов. С целью подтверждения разработанной модели была проведена серия экспериментов с двумя параметрическими рядами тросовых виброизоляторов разной конструкции.

2.1. Математическая модель

Математическая модель условно была разбита на две основные части: модель виброизолятора и модель упругодемпфирующего элемента.

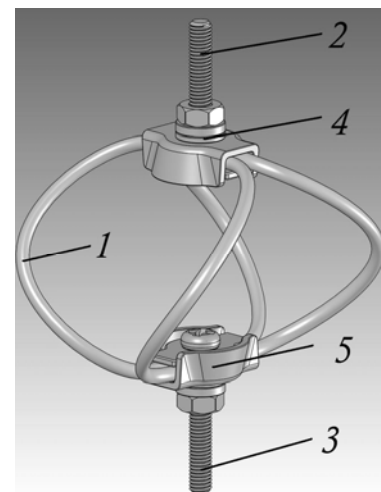


Рис. 6 – Конструкция виброизоляторов, участвующих в эксперименте

На рисунке 2 представлен образец виброизолятора, где 1 – квазинепрерывный упругодемпфирующий элемент

⁸ Например, патент US3039725A1 (США).

⁹ Например, патент US3074681A1 (США).

регулярной структуры [5]; 2,3,4,5 – элементы крепления. Конструкция представленного виброизолятора была описана следующими математическими соотношениями [1]:

$$(1), \quad \varphi_i = \frac{\pi}{2(n-1)} \cdot (i-1);$$

$$(2), \quad \alpha_i = \frac{\pi}{n-1} \cdot (i-1);$$

$$(3), \quad x_i = [R \sin \alpha_i \cos \varphi_i] - \frac{b}{2} \cdot \cos \varphi_i - \frac{a}{2} \cdot \sin \varphi_i;$$

$$(4), \quad y_i = [R \sin \alpha_i \cos \varphi_i] + \frac{b}{2} \cdot \cos \varphi_i + \frac{a}{2} \cdot \sin \varphi_i;$$

$$(5), \quad z_i = R[1 - (\cos \alpha_i)];$$

$i=1, 2, 3, \dots, n,$

где R – радиус сферы, поверхность которой совпадает с осью упругого элемента, a и b – ширина обоймы и расстояние между осями заделанного в обоймах троса.

Модель упругодемпфирующего элемента была создана на базе КЭ-комплекса ANSYS. Был определен набор параметров, описывающих упругогистерезисные характеристики элемента и виброизолятора в целом [1]:

– модуль упругости материала E , Н/м²;

– коэффициент Пуассона μ ;

– параметры, определяющие конструкцию поперечного сечения элемента: число проволок n , диаметр проволок d_i , м, исходный радиус кривизны осевой линии элемента R , м, ее угловая протяженность θ , рад., моменты инерции сечения относительно осей x и z – J_x, J_z .

$$(6), \quad F_i = 5 \left(\frac{\pi d_u^2}{4} + \frac{3\pi d_{nep}^2}{2} \right)$$

– площадь поперечного сечения упругого элемента, м²,

где d_u и d_{nep} – диаметры центральной и периферийной проволок, соответственно;

$$(7), \quad J_i = 5 \left(\frac{\pi d_u^4}{64} + \frac{3\pi d_{nep}^4}{32} \right)$$

– момент инерции поперечного сечения упругого элемента, м⁴;

$$(8), \quad r = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$$

– эквивалентный радиус упругого элемента, м.

Была построена упругая линия, выбран тип конечного элемента (BEAM4), проведена разбивка на конечные элементы и заданы кинематические и динамические граничные условия исходя из параметров рассматриваемой конструкции. Деформации упругого элемента были заданы из рабочего диапазона виброизолятора. Была установлена опция нелинейного анализа системы при деформации (NLGEOM) и проведен расчет, в ходе которого были определены нагрузки, соответствующие заданным деформациям в трех взаимно перпендикулярных направлениях y (ось виброизолятора), x и z . Полученные характеристики были представлены в размерном и безразмерном виде.

Аналитические выражения для расчета безразмерных нагрузочных характеристик элемента виброизолятора имеют вид [1]:

$$(9), \quad \beta_i = \sum_{j=1}^4 c_{ij} \cdot \zeta_i^j$$

$$i = x, y, z;$$

– безразмерная нагрузка;

где ζ_i – безразмерная деформация, коэффициенты c_{ij} приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты для расчета безразмерных нагрузочных характеристик [1]

$j \rightarrow$	1	2	3	4
c_{xi}	0.381	-0.0729	0.0599	-0.00953
c_{yi}	0.381	-0.0729	0.0599	-0.00953
c_{zi}	0.988	-0.8660	0.4690	-0.09260

Таким образом, чтобы рассчитать упругую нагрузочную характеристику элемента в направлении соответствующей оси, необходимо воспользоваться обратным преобразованием

$$(10), \quad P_i = \frac{EJ}{R^2} \cdot \beta_i$$

– нагрузка на виброизолятор, Н;

$$(11), \quad u_i = \zeta_i \cdot R$$

– деформация, м.

Здесь, как и ранее, под индексами i подразумеваются индексы x, y и z .

Определив производную от соответствующей нагрузочной характеристики, пронормировав ее по начальному значению, а затем экспериментально, найдя обобщенную силу трения T , можно рассчитать поле петель гистерезиса. При этом можно воспользоваться либо упрощенными формулами [1], либо моделью трения Чегодаева – Пономарева с плавными обводами петель гистерезиса в виде (подробнее о построении математической модели см. [1], [2], [3]):

$$(12), \quad T = T_0 \cdot \text{sign}(\dot{s}) \cdot [1 - 2 \cdot \exp\{-k \cdot |s - s_0 \cdot \text{sign}(\dot{s})|\}]$$

– обобщенная сила трения, Н.

2.2. Экспериментальное подтверждение



Рис. 7 – Экспериментальный образец виброизолятора.

Для подтверждения математической модели была проведена серия статических и динамических испытаний с образцами виброизоляторов разного размера (см. рис. 7): получение гистерезисных петель образцов по трем взаимно перпендикулярным осям; по боковым осям x и z с предварительной нагрузкой и разгрузкой; определение площади петель, среднециклической жесткости, коэффициента рассеивания энергии, коэффициента демпфирования; определение массы нагрузки на виброизолятор из условия достижения собственной частоты системы 10 Гц; построение графиков зависимости входной и выходной амплитуд от времени испытания; определение на основе эксперимента амплитудно-частотной характеристики, коэффициента усиления входного сигнала (динамического коэффициента рассеивания энергии). Основные результаты представлены на рисунках 8, 9 и 10.

Контрольная группа состояла из пяти образцов, дифференцированных по параметру R (радиус сферы, поверхность которой совпадает с осью упругого элемента) (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Значения параметра дифференциации опытных образцов

	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5
R, мм	15,5	16,85	18,75	20,75	26,1

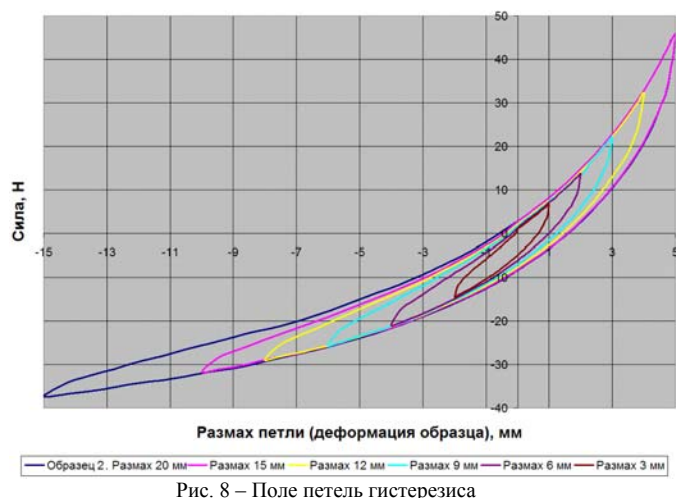


Рис. 8 – Поле петель гистерезиса

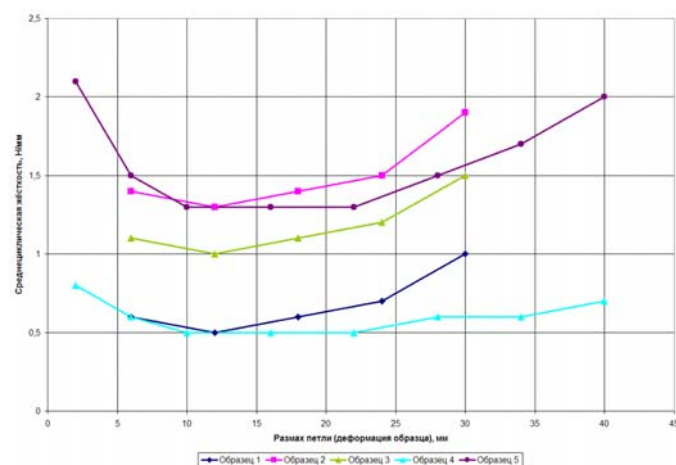


Рис. 9 – Среднециклическая жесткость образцов

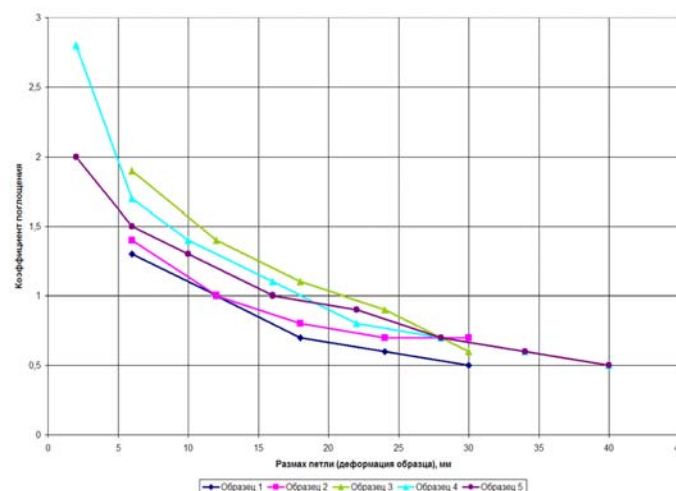


Рис. 10 – Коэффициент поглощения образцов

Статические испытания были выполнены на стенде, представляющим собой устройство, способное осуществлять деформацию образца вдоль одной оси, измеряя при этом силу его реакции. Фиксирование данных производилось посредством специального программного обеспечения Win Test – WDW в автоматическом режиме.

Испытательно-механическая часть стенда для динамических испытаний представляет собой металлическую пластину, которая под воздействием электромагнита может совершать колебания вдоль вертикальной оси с заданной амплитудой и частотой. Испытательно-измерительная часть основана на трех датчиках виброускорения, которые через усилитель сигнала передают данные на предварительную обработку. Обработка результатов измерений осуществлялась с помощью комплекса сбора данных NI LabView.

3. Заключение

На основе анализа результатов были сделаны выводы: при первом нагружении площадь петли на 5...7% выше, чем в последующих. Жесткость элемента можно регулировать, изменяя параметры троса. Так, уменьшение диаметра троса снижает, а уменьшение диаметра квазинепрерывного кольца – увеличивает жесткость упругодемпфирующего элемента. Было установлено, что исследуемый тип виброизоляторов обладает несимметричной нагрузочной характеристикой при центральном растяжении-сжатии: «жесткой» – при растяжении, «мягкой» – при сжатии.

Коэффициент поглощения снижается с увеличением амплитуды деформации от максимального значения 2,8. В диапазоне от 5 до 15 мм среднециклическая жесткость остается примерно постоянной, обеспечивая устойчивость собственной частоты системы. Петли гистерезиса, полученные при малой (статической) и большой (псевдинамической) скоростях нагружения, совпадают с погрешностью менее 3%, что позволяет использовать параметры, определенные в статике, для расчета сложных динамических систем.

В целом, можно утверждать, что теоретические аспекты данного исследования хорошо согласуются с экспериментом.

4. Литература

1. Пономарев Ю.К., Калакуцкий В.И. Многослойные цельнометаллические виброизоляторы с упругими элементами регулярной структуры. – Самара: Изд-во СГАУ, 2003. – 198 с.
2. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 296 с.
3. Исследование упругогистерезисных характеристик виброизоляторов с многослойными криволинейными упругими элементами / Пономарев Ю., Калакуцкий В. и др. Сборник трудов IV международного конгресса «Mechanical engineering technologies», Varna, Bulgaria, 2004. – т. 6, с. 106-110.
4. Белниколовски Б., Дунчев Г., Баннов С. Теоретико-экспериментально изследване на цилиндрични въезени виброизолатори (ВВИЦ). – В журнале «Машиностроене», 39, №6, София, с. 257-259.
5. Патент №2199683 РФ, МПК F16F 7/14. Способ изготовления упругофрикционных элементов тросовых виброизоляторов / Пономарев Ю.К., Архангельский С.В., Гунин В.А. и др. Заявл. 24.11.00, опубл. 27.02.03 Бюл. №6.
6. Патент №1602912 США. Universal Joint / A.H. Leipter. Заявл. 15.03.1923, опубл. 12.10.1926
7. Патент №3087313 США. Isolator type shaft coupling devices / J.J. Kerley. Заявл. 08.12.1959, опубл. 30.04.1963
8. Патент №103 20 737 A1 Германия. Offenlegungsschrift/ Lischeck, Andre, Schinzel, Ralf, Kuprianow, Waldemar. Заявл. 09.05.2003, опубл. 18.11.2004
9. Патент №10 2006 046 749 A1 Германия. Offenlegungsschrift/ Sebert, Karl. Заявл. 29.09.2006, опубл. 03.04.2008