УДК 534.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ УПРУГОЙ ЛЕНТЫ С ШАРИКАМИ И БЕЗ ШАРИКОВ НА СТЕНДЕ «АЛЛИГАТОР 2М» ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ И ДВУСТОРОННЕМ ВОЗБУЖДЕНИИ

© Николай Алексеевич Серков¹, Олег Викторович Пась²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
Serkov1943@mail.ru

² ФГУП «НПО «Техномаш», Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования поведения упругой ленты с шариками на стенде «Аллигатор 2М». Каретки совершают колебательные движения под воздействием двух электровозбудителей. Экспериментальный стенд «Аллигатор 2М» создан для исследования динамических процессов в механических колебательных системах с упругими звеньями и распределенными массами.

Ключевые слова: механические колебательные системы, низкочастотный генератор сигнала, электровозбудитель, бериллиевая лента с шариками, настраиваемые ограничители.

Работа поддержана грантом РФФ, проект № 19-19-00065.

EXPERIMENTAL STUDIES OF VIBRATION OF AN ELASTIC TAPE WITH BALLS AND WITHOUT BALLS AT THE "ALLIGATOR 2M" STAND UNDER UNILATERAL AND BILATERAL EXCITATION

© N.A. Serkov¹, O.V. Pas²

¹ The federal state budgetary establishment of science the Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Serkov1943@mail.ru

² FSUE "NPO "Technomash", Moscow, Russia

Abstract. The results of a study of the behavior of an elastic tape with balls at the "Alligator 2M" stand are presented. The carriages oscillate under the influence of two electric exciters. The experimental stand "Alligator 2M" was created to study dynamic effects in distributed systems.

Key words: vibration shock systems with a large number of degrees of freedom, signal generator, power amplifier, vibration exciter, tape with balls, adjustable stops.

Acknowledgements. The research supported by Russian Science Foundation, project No 19-19-00065.

Введение. Вибрации и удары являются широко распространенными динамическими нагрузками в машинах самого разнообразного функционального назначения, в частности, в станках, роботах и КИМ. В [1—3] представлены результаты исследования динамических процессов, протекающих в механизмах с упругими звеньями и зазорами в кинематических парах. В этих работах описаны результаты экспериментов, проведенных на специально созданной установке «Аллигатор», позволяющей изучать виброударные процессы при колебании упругой бериллиевой ленты с шариками, ударяющимися об упоры. Экспериментальные работы показали, что колебательная система «упругая бериллиевая лента с шариками и упоры», обладает малой диссипацией и легко приходит в движение при малых возбуждающих силах.

Эта установка имеет простую конструкцию, но обладает одним существенным недостатком, который заключается в том, что система управления электромагнитами, воздействующими на закрепленные на упругой ленте шарики, достаточно сложна и для решения различных задач исследования колебаний ленты требуется разработка специальных алгоритмов управления и постоянная модификация системы управления. Поэтому в ИМАШ РАН был создан стенд «Аллигатор 2М», развивающий идеи конструкции предшествующего стенда «Аллигатор» и лишенный указанного недостатка.

В работах [4-5] описаны наиболее важные результаты экспериментального исследования колебаний упругой ленты с шариками в тестовом режиме на стенде «Аллигатор 2М».

В настоящей работе представлены результаты дальнейших исследований колебаний упругой ленты с шариками и без шариков, закрепленной между подвижными каретками, и совершающими колебания под воздействием двух вибровозбудителей. Исследования направлены на изучение природы возникновения поперечных колебаний как в плоскости натянутой ленты, так и перпендикулярно ей.

На рис. 1 представлены основные предшественники создания стенда «Аллигатор 2М». Для изучения студентами колебаний струны при различной величине её натяжения используется учебный стенд, представленный на рис. 1, а) [6]. На рис. 1, б) представлена схема стенда для изучения виброударных процессов при колебании упругой бериллиевой ленты с шариками, ударяющимися об упоры [3]. В работе [7] приводятся сведения о конструкции учебного стенда для изучения колебаний струны с вертикальным расположением струны и электромагнитным возбуждением с одного конца. Стенд «Аллигатор 2М» вообрал в себя лучшее из указанных стендов.

Рис. 1. Развитие стендов исследования динамических эффектов в распределенных системах: а) учебный стенд для изучения колебаний струны, б) исследовательский стенд «Аллигатор» и «Аллигатор 1»

Конструкция стенда. На рис. 2 представлена схема стенда «Аллигатор 2М», конструкция которого, описана в работе [4].

Рис. 2. Основные узлы стенда «Аллигатор 2М», измерительная аппаратура и интерфейс с ноутбуком

На рис. 3 представлен общий вид стенда. Он состоит из: двух электровибровозбудителей колебаний, регулируемых ограничителей колебаний, системы возбуждения (низкочастотный двухканальный генератор, два усилителя мощности) и комплекса измерительной аппаратуры.

Рис. 3. Общий вид стенда «Аллигатор 2М»

Через двухканальный генератор сигналов мод. JUNTEK JDS2800 задается частота колебаний

вибровозбудителей, а амплитуда устанавливается с помощью усилителей мощности LV 103 (рис. 2). Двухканальный генератор сигналов позволяет осуществлять сдвиг по фазе сигнал одного канала относительно другого.

Амплитуда колебаний ленты, шариков и кареток измеряется двумя лазерными датчиками перемещений ILD1320-10, связанными с ноутбуком через конвертер IF2001/USB.

Визуальное наблюдение и идентификация исследуемых процессов поведения упругой ленты и других элементов стенда оперативно проводятся с помощью предусмотренного стробоскопа.

Колебания ленты с шариками

Собственные частоты. Для проведения экспериментальных работ на стенде необходимо знать (оперативно определять) собственные частоты системы - лента с шариками, жестко закрепленная на концах, и уровень стабильности этой характеристики. Поэтому было проведено измерение собственных частот упругой системы через год (натяжение ленты не менялось).

На рис. 4 представлены направления возможных свободных колебаний ленты с шариками (рис. 4, а) и их «привязка» к расположению ленты на стенде (рис. 4, б).

Рис. 4. Направления свободных колебаний шарика на ленте

Эксперименты показали, что на стенде наблюдаются следующие свободные колебания упругой ленты с шариками с амплитудой $\geq 0,1$ мм (заметной «на глаз») [4-5]:

- 1) поперечные изгибные колебания в направлении оси Y,
- 2) поперечные изгибные колебания в направлении оси Z,
- 3) крутильные колебания вокруг оси X.

Собственные изгибные колебания f_{cy} в направлении оси Y измерялись на ленте между шариками № 5 и № 6. Упругая система (лента) нагружалась натягом в 2 мм между шариком № 5 и упором (вставлялась пластина толщиной 2 мм). При снятии нагрузки лента с шариками совершала свободные колебания, являющихся суперпозицией всех мод.

При размещении линии измерения лазерного датчика перемещений ILD1320-10 на середине ленты (рис. 5, а), можно с высокой степенью точности отделить (измерить) собственные поперечные изгибные колебания в направлении оси Y, f_{cy} от всех остальных мод. На рис. 5, б) представлен временной сигнал перемещения пятна лазера при таком расположении линии измерения, а на рис. 5, в) спектр собственных частот колебаний ленты с шариками ($f_{cy} = 6,8$ Гц).

Рис. 5. Свободные изгибные колебания f_{cy} в направлении оси Y : а) схема измерения, б) затухающие свободные колебания (временной сигнал), в) спектр частот колебаний

Собственные изгибные колебания f_{cz} в направлении оси Z измерялись аналогичным способом, только лента «оттягивалась» вверх вдоль оси Z и резко «освобождалась», а измерение перемещений шарика на ленте лазерным датчиком осуществлялось в соответствии с рис. 6, а). На рис. 6, б) показан временной сигнал свободных колебаний в направлении оси Z , а на рис. 6, в) показан спектр колебаний, на котором видны два пика. Один из них – 9,8 Гц, соответствует крутильным колебаниям вокруг оси X , а другой – 11,7 Гц соответствует изгибным колебаниям вдоль оси Z . Это удалось выявить с помощью стробоскопического фонаря, наблюдая отдельно изгибные колебания вдоль Z и крутильные вокруг оси X .

Собственные крутильные колебания f_{cx} вокруг оси X измерялись аналогичным образом. Временной сигнал представлен на рис. 7, б), а спектр - на рис. 7, в), на котором видны два пика. Колебания с частотой 8,8 Гц соответствуют крутильным вокруг оси X , а колебания с частотой 6,8 Гц соответствуют изгибным колебаниям вдоль оси Y . Это видно с помощью стробоскопического фонаря, наблюдая отдельно изгибные колебания вдоль Y и крутильные вокруг оси X .

Рис. 6. Свободные изгибные колебания f_{cz} в направлении оси Z: а) схема измерения, б) временной сигнал перемещения шарика, в) спектр колебаний шарика в направлении оси Z.

Рис. 7. Свободные изгибные колебания f_{cz} в направлении оси Z: а) схема измерения, б) временной сигнал перемещения шарика, в) спектр колебаний шарика в направлении оси Z.

Следует отметить, что по мере эксплуатации стенда происходит изменение собственных частот. Замечено, что за год существенно изменилась только крутильная собственная частота $f_{cA1} = 9.8$ Гц (2020 г.) и $f_{cA1} = 8.8$ Гц (2021 г.).

Гашение изгибных колебаний в направлении оси Z в плоскости ленты (ZX). При тестировании стенда было выявлено, что происходит виброгашение изгибных поперечных колебаний в плоскости XZ при возбуждении ленты с двух сторон на 1-й собственной частоте $f_{cZ} = 11,72$ Гц при нулевом сдвиге фазы между сигналами каналов генератора. Наложение колебаний должно было соответствовать рис. 8, а), а оно соответствует рис. 8, б). (A – амплитуда результирующего колебания, A_1 и A_2 – амплитуды накладываются колебаний).

Разность фаз равна четному числу π

а)

Разность фаз равна нечетному числу π

б)

Рис. 8. Сложение гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты: а) разность фаз равна нулю или четному числу π , б) разность фаз равна нечетному числу π

Было сделано предположение, что причиной возникновения этого явления есть неточность установки направляющих, по которым движутся каретки, как это представлено на рис. 9. Направляющие каретки №1 развернуты на некоторый угол относительно направляющих каретки №2 в плоскости YZ.

Рис. 9. Пространственное расположение направляющих каретки №1 относительно направляющих каретки №2.

Ниже представлены результаты изучения этого вопроса путем проведения эксперимента, описанного ниже.

При возбуждении только левой каретки с частотой $f_b = 11,72$ Гц через усилитель мощности были установлены колебания шарика № 5 в направлении оси Z с размахом амплитуды $2a = 2,50$ мм. При возбуждении только на правой каретке с частотой $f_b = 11,72$ Гц через усилитель мощности были установлены колебания шарика № 5 в направлении оси Z с размахом амплитуды $2a = 2,57$ мм.

С этими настройками было осуществлено одновременное возбуждение левой и правой кареток и наблюдалось существенное уменьшение амплитуды колебаний (рис.10) (*размах $2a = 0,4$ мм*).

Для выяснения возможной причины гашения колебаний на шарике № 5 была измерена разность фаз перемещения кареток № 1 и № 2 в направлении оси Z с помощью двух лазерных датчиков. Для этого осуществлялась одновременная запись временных сигналов с двух датчиков $y_1(t)$ и $y_2(t)$ в два файла с расширением .csv, которые далее обрабатывались в среде Matlab.

Рис. 10. Колебания шарика № 5 в направлении оси Z при одновременном возбуждении двух кареток: а) временной сигнал перемещения (размах $2a = 0,4$ мм), б) спектр

При этом были решены три задачи: 1) задача «синхронизации» сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ колебаний кареток № 1 и № 2, записанных в двух файлах с расширением .csv, 2) задача фильтрации (выделение гармоник 11, 75 Гц) и 3) задача определения разности фаз с помощью метода, основанного на преобразовании Гильберта: $y1_h = \text{hilbert}(y1)$.

На рис. 11 показана кривая сдвига фаз между выделенными гармониками ($f = 11,7$ Гц) сигналов с кареток (среднее значение $\text{mpg} = 1.5012$ радиан ($86,012^\circ$) при сдвиге на генераторе 0°).

Наилучший результат по гашению колебаний удалось получить, варьируя двумя параметрами: 1) сдвигом фазы на генераторе и 2) амплитудой колебаний через усилители мощности. На рис. 12 представлен временной сигнал перемещения шарика № 5 в направлении оси Z, отображенный на экране ноутбука с помощью ПО лазерного датчика ILD1320-10. Этому результату $2a = 0,029$ мм соответствует фазовый сдвиг $\pm 6^\circ$ на генераторе сигналов возбуждения.

Рис. 11. Сдвиг фаз между сигналами перемещения кареток по оси Z (при сдвиге на генераторе 0°)

Рис.12. Временной сигнал перемещения шарика № 5 в направлении оси Z при фазовом сдвиге $\pm 6^\circ$ на генераторе сигналов возбуждения.

На рис. 13 представлен временной сигнал колебаний шарика №5 в направлении Z при возбуждении левой и правой каретки сигналами генератора $f_b = 11,72$ Гц при сдвиге одного сигнала относительно другого $\pm 174^\circ$.

Амплитуда размаха временного сигнала составляет $2a = 2,225$ мм. При этом усилитель мощности электровозбудителя левой каретки настроен так, что размах колебаний на шарике № 5 равен $2a=1,667$ мм (правая каретка без сигнала возбуждения) и усилитель мощности электровозбудителя правой каретки настроен так, что размах колебаний на шарике №5 равен $2a=1,481$ мм (левая каретка без сигнала возбуждения). Амплитуды колебаний «складываются».

Рис.13. Временной сигнал перемещения шарика № 5 по оси Z при одновременном возбуждении двух кареток частотой $f_b = 11,72$ Гц при фазовом сдвиге $\pm 174^\circ$ и спектр колебаний.

Гашение изгибных колебаний в направлении оси Y в плоскости YZ происходит в соответствии с классическим представлением сложения гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты (рис. 8.), что подтверждают результаты эксперимента на стенде, представленные ниже.

При возбуждении ленты с шариками только правой кареткой с помощью усилителя мощности установлена амплитуда колебаний шарика № 5 в направлении Y на частоте 6,8 Гц (1-я собственная частота ленты с шариками в направлении Y) в размере $2a = 1$ мм рис. 14, а). Аналогично была установлена амплитуда колебаний ($2a = 1$ мм) шарика № 5 в направлении Y при возбуждении только левой кареткой (рис. 14, б).

а)

б)

Рис.14. Временной сигнал перемещения шарика № 5 по оси Y: а) при возбуждении ленты с шариками только правой кареткой ($2a = 1$ мм), б) при возбуждении ленты с шариками только левой кареткой ($2a = 1$ мм)

На рис. 15. представлены временные сигналы колебания шарика № 5 в направлении Y при возбуждении ленты с шариками с двух концов (при настройках стенда, соответствующих

рис. 14): а) при нулевом сдвиге фазы между сигналами каналов генератора, питающего вибровозбудителя, б) при сдвиге фазы между сигналами каналов генератора равном 180° .

1. Исследования показали наличие 2-х типов колебаний:

- крутильные колебания типа «кручение», которые наблюдаются также у ленты с шариками;
- крутильные колебания типа «гамак», которые не наблюдаются у ленты с шариками.

Указанное разграничение типов колебаний легко выявляется визуально в стробоскопическом свете. Выявление «природы» возникновения таких типов колебаний упругой ленты без шариков требует дополнительных исследований.

2. Частота собственных колебаний ленты без шариков, как и ленты с шариками, зависит от натяжения ленты и примерно в 1,5 раза выше собственных частот ленты с шариками;

Схема измерения перемещения точки на ленте при определении спектра собственных частот аналогична рис. 7, а), только на ленте отсутствуют шарик. Для измерения свободных колебаний осуществляется натяг пальцами (скручивается лента) и резко отпускается. При этом осуществляется запись свободных колебаний участка ленты (пятна лазерного датчика на ленте). На рис. 17, а) представлен временной сигнал перемещения точки на ленте, в) увеличенный фрагмент временного сигнала, г) спектр собственных частот

Рис.17. Свободные колебания ленты без шариков: а) схема измерений колебаний ленты, б) временной сигнал (перемещение – время), в) увеличенный фрагмент временного сигнала, г) спектр колебаний

При возбуждении одной из кареток синусоидальным сигналом на частоте $f_6 = 30, 27$ Гц при закрепленной второй каретке наблюдаются в стробоскопическом свете устойчивые крутильные колебания типа «кручение» на 1-й собственной частоте.

При возбуждении одной из кареток синусоидальным сигналом на частоте $f_6 = 52, 25$ Гц при закрепленной второй каретке наблюдаются в стробоскопическом свете устойчивые крутильные колебания типа «гамак» на 1-й собственной частоте.

Обсуждение результатов

Представленные результаты экспериментального исследования свойств упругой ленты с шариками, закрепленной концами на подвижных каретках, показывают, что механическая колебательная система стенда действительно очень чувствительна к возбуждающим колебаниям кареток и обладает малой диссипацией.

Собственные частоты стабильны. Основные частоты (первые гармоники) механической колебательной системы в зависимости от упругой ленты (с шариками или без) находятся в диапазоне 5 - 60 Гц, что соответствует собственным частотам несущих систем машин «среднего» размера различного функционального назначения.

Гипотеза о влиянии неточности установки направляющих кареток к вертикали (горизонту) на возникновение колебаний в плоскости YZ подтверждается результатами проведенных исследований.

Проведенные исследования показывают, что созданный стенд «Аллигатор 2М» позволяет изучать вибрационные процессы в несущих конструкциях машин, в которых возникают колебания путем переноса энергии бегущими волнами, в частности, при изучении возникновения колебаний в несущих системах фрезерных станков. В развитии этих работ целесообразно проведение исследовательских работ на данном стенде с использованием вместо упругой гибкой ленты упругого длинного стержня прямоугольного сечения с шариками.

Опыт создания стенда может быть использован при построении аналогичных учебных стендов в вузах, в которых изучаются волны и вибрационные поля в несущих системах машин, а созданный стенд «Аллигатор 2М» целесообразно использовать в дальнейшем в составе оборудования ЦКП при ИМАШ РАН «Исследование и диагностика точности и жесткости машин-автоматов»

Вывод

Созданный стенд «Аллигатор 2М» позволяет проводить экспериментальные исследования возникновения, распространения и затухания бегущих и стоячих волн в упругих средах несущих систем машин с основными собственными частотами несущей системы в пределах 3-100 Гц.

Список литературы

1. В.К. Асташев, В.Л. Крупенин, А.Н. Тресвятский. Экспериментальное исследование синхронизации ударов в распределенных системах с варьируемым числом ударных пар // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1996. - № 2. - С. 96 – 101.
2. В.К. Асташев, В.Л. Крупенин. Волны в распределенных и дискретных виброударных системах и сильно нелинейных средах // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1998. - № 5. - С. 13-30.
3. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Эксперименты с протяженными виброударными

- системами (резонансные движения) // Вестник научно-технического развития. – 2010. - № 7 (35). - С. 3-10. [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.vntr.ru](http://www.vntr.ru). (дата обращения: 06.11.2019).
4. Асташев В.К., Серков Н.А. и Пась О.В. Тестирование экспериментального стенда «АЛЛИГАТОР 2М» и определение собственных частот упругой ленты с шариками, закреплённой на концах // Вестник научно-технического развития. - 2020. - № 9(157). - С.3-17. [Электронный ресурс] URL: [http:// www.vntr.ru](http://www.vntr.ru) (дата обращения: 29.11.2020).
 5. Асташев В.К., Серков Н.А. и Пась О.В. Результаты исследования поведения ленты с шариками на экспериментальном стенде «АЛЛИГАТОР 2М» в тестовом режиме // Вестник научно-технического развития. - 2021. - № 160. - С. 13-24. [Электронный ресурс] URL: [http:// www.vntr.ru](http://www.vntr.ru) (дата обращения: 29.11.2021).
 6. Попов П.В. и Смирнова О.В. Учебный стенд для ИЗУЧЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ СТРУНЫ. Лабораторная работа 1.4.5 по курсу «Общая физика». МОСКВА, МФТИ, 2021. 16 с. [Электронный ресурс] URL: https://mipt.ru/education/chair/physics/S_I/lab/string_145.pdf (дата обращения: 24.01.2022).
 7. Лабораторная работа 26. Общий физический практикум. Механика /Под ред. А.Н. Матвеева, Д.Ф. Киселева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 272 с. Ил.81. [Электронный ресурс] URL: <https://studizba.com/files/show/djvu/2337-1-a-n-matveev-d-f-kiselev--obschiy.html> (дата обращения: 24.01.2022).

Дата поступления: 20 декабря 2021 г.