УДК 534.1

ТЕСТИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА «АЛЛИГАТОР 2М» И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ УПРУГОЙ ЛЕНТЫ С ШАРИКАМИ, ЗАКРЕПЛЁННОЙ НА КОНЦАХ

© Владимир Константинович Асташев, Николай Алексеевич Серков, Олег
Викторович Пась

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

Serkov1943@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты тестирования экспериментального стенда «аллигатор 2М» для исследования динамических эффектов в распределенных системах с многими параллельными ударными парами.

Ключевые слова: виброударные системы с большим числом степеней свободы, генератор сигнала, усилитель мощности, вибровозбудитель, лента с шариками, регулируемые упоры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-19-00065).

TESTING OF THE EXPERIMENTAL STAND "ALLIGATOR 2M" AND DETERMINING THE NATURAL FREQUENCIES OF AN ELASTIC BAND WITH BALLS ATTACHED TO THE ENDS

© V.K. Astashev, N.A. Serkov, O.V. Pas

IMASH RAN, Moscow, Russia

Serkov1943@mail.ru

Abstract. The results of testing the experimental stand "alligator 2M" for the study of dynamic effects in distributed systems with many parallel shock pairs are presented.

Keywords: 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 was supported by RSF (project No. 19-19-00065).

Введение. Виброударные процессы являются одними из основных среди динамических процессов, возникающих в различных машинах. В работах [1—7] изучались динамические эффекты в распределенных системах, оснащенных многими параллельными ударными парами. В работах [1—3,7] были представлены результаты экспериментальных исследований на установке «Аллигатор», специально созданной для изучения важного в приложениях случая, когда число ударных пар значительно и расположены они относительно редко.

Эксперименты были посвящены изучению свойств резонансных виброударных процессов, существующих при малой диссипации за счет малых сил возбуждения. Они показали работоспособность данного экспериментального подхода. Наряду с этим было выявлено, что управление отдельными электромагнитами, осуществляющими возбуждающее воздействие на шарики, закреплённые на упругой ленте, требует специальной системы управления, реализующей специфические алгоритмы.

В последнее время проводятся дальнейшие экспериментальные работы. В работе [8] описаны результаты создания несущей и упругой систем экспериментального стенда «Аллигатор 2М».

Для дальнейшего развития экспериментальных работ было проведено дооснащение стенда «Аллигатор 2М»:

- 1) Установлен 2-й вибровозбудитель мод. 11075 с усилителем мощности LV 103.
- 2) Заменен генератор низких частот Г 3-36 на генератор низких частот мод. Victor VC 2003, позволяющий возбуждать упругую систему на частотах, начиная с 1Гц., что важно для данного стенда с 1-й собственной частотой упругой ленты с шариками в районе 7, 813 Гц для изгибных колебаний и 9,766 Гц для крутильных колебаний.
- 3) Напаяны шарики на ленту из бериллиевой бронзы.
- 4) Установлены, выставлены и закреплены 10 кронштейнов с регулируемыми упорами.
- 5) Смонтирован лазерный датчик перемещений ILD1320-10 на магнитной стойке.
- 6) Смонтированы блок питания (AC-DC преобразователь) 220 в → 24 в и адаптер (мод. Конвертер IF2001/USB) на отдельной переносной плате.
- 7) Разработана программа в среде Matlab и методика обработки сигнала с лазерного датчика перемещений ILD1320-10 (графическое отображение «перемещение – время» → амплитуда колебаний и спектр частот).

Дооснащение стенда. На рис. 1 представлена схема дооснащенного стенда «Аллигатор 2М». Стенд дает возможность реализовать как безударные (линейные или квазилинейные), так и разнообразные виброударные процессы в присутствии односторонних и двусторонних ограничителей в системах с предварительным зазором или натягом с одновременным возбуждением ленты с двух сторон.

Стенд представляет собой многомассную колебательную систему, два электромагнитный вибровозбудителя колебаний, ограничители колебаний с устройствами установки и регулировки зазоров, систему возбуждения и комплекс измерительной аппаратуры. Упругая система выполнена в виде ленты из бериллиевой бронзы БрБ2 Т с жестко закрепленными (напаянными) на ней на равных расстояниях друг от друга 10 шариками Ø 12 мм из закаленной стали ШХ15. Лента своими концами жестко закреплена через рым-болты на каретках, перемещающихся на направляющих, установленных на опорах, жестко закреплённых на швеллере, который, в свою очередь, присоединяется болтами к сварной раме стеллажа (рис.2). Длина ленты между точками присоединения к кареткам составляет 935 мм, расстояние между шариками - 85 мм, ширина ленты - 8 мм, толщина - 0,1 мм. Натяжение ленты осуществляется с помощью двух рым-болтов, установленных на подвижных каретках, что хорошо видно на рис.2.

Частота возбуждающих колебаний регулируется (устанавливается) с помощью генератора низких частот мод. Victor VC 2003, а амплитуда возбуждающих колебаний с помощью двух усилителей мощности LV 103 (рис. 1).

Рис.1. Основные узлы станда «Аллигатор 2М»

Контроль частоты и амплитуды возбуждающих колебаний можно осуществлять с помощью лазерного датчика ILD1320-10, общий вид которого представлен на рис. 3, а), а на рис. 3, б) показана установка датчика для измерения колебаний вибровозбудителя № 2 (с обратной стороны).

Рис. 2. Общий вид станда «Аллигатор 2М»

Рис. 3. Лазерный датчик ILD1320-10: а) общий вид датчика, б) установка датчика для измерения колебаний якоря вибровозбудителя № 2

На рис. 4 показан блок питания (*AC-DC преобразователь*) 220 в → 24 в и адаптер (мод. конвертер IF2001/USB), смонтированные на отдельной переносной плате, необходимые для работы лазерного датчика ILD1320-10.

Рис. 4. Переносная плата блок питания и конвертер IF2001/USB

На рис. 5 представлена схема расположения измерительной аппаратуры и её связи с ноутбуком.

Для измерения моментов времени касания шариков с упорами в стенде предусмотрены пьезодатчики вибрации (Рис. 6), устанавливаемые на регулируемые упоры. Сигналы с пьезодатчиков вибрации поступают в ноутбук через систему сбора данных L-card E 502 (многоканальный модуль АЦП) и далее обрабатываются программой LGraph2 и записываются в выходной файл.

Рис. 5. Схема расположения измерительной аппаратуры и её связи с ноутбуком

Рис. 6. Пьезодатчик вибрации PIEZZO-KNOCK: а) общий вид датчика, б) место установки пьезодатчиков вибрации

Измерение движения точки (пятна лазера, диаметром $<0,16$ мм) на поверхности шарика или ленты осуществляется оптическим датчиком перемещений ILD1320-10, который связан с ноутбуком через конвертер IF2001/USB. Датчик перемещений ILD1320-10

устанавливается на магнитной стойке и может фиксироваться в любом положении вдоль колеблющейся упругой ленты с шариками или в любом другом месте.

Для визуального наблюдения и идентификации исследуемых процессов стенд снабжен цифровым стробоскопом. Частоту вспышек лампы стробоскопа можно синхронизировать с сигналом от генератора. В этом случае при возбуждении периодических процессов с частотами, равными частоте возбуждения, в стробоскопическом свете наблюдается неподвижная форма ленты, которую можно зарегистрировать. При включении внутренней синхронизации стробоскопа и введении малой частотной расстройки вспышек стробоскопа по отношению к частоте исследуемого процесса наблюдается медленное движение ленты с шариками.

Испытание и тестирование стенда

Генератор низких частот Victor VC 2003. Диапазон частот 1 Гц – 3 МГц. Общий вид генератора представлен на рис. 7, а).

На рис. 7, б) показан выходной сигнала с генератора Victor VC 2003 частотой 5 Гц, измеренный с помощью L-card E 502 и LGraph2.

Рис. 7: а) Общий вид генератора Victor VC 2003, б) сигнал с выхода генератора 5 Гц, измеренный через АЦП E -502

На рис. 8 представлен сигнал перемещения на левой каретке от возбуждения с левого электровозбудителя на частоте 5 Гц (рабочий диапазон вибровозбудителя 11075). Здесь наблюдаются существенные искажения формы колебаний в области реверса (виден «срез» вершины). Ещё большие искажения наблюдаются на частоте 1 Гц (Рис. 9, не рабочий диапазон вибровозбудителя 11075).

Сигнал, снимаемый с вибровозбудителя № 2. На рис.10 представлен сигнал перемещения вибровозбудителя № 2 с отключенной упругой системой (рис. 10, б).

Частота сигнала (рис. 10, а) четко 10 Гц. В зоне реверса (скорость перемещения переходит через ноль) наблюдается срез вершины синусоиды (возможно следствие гистерезиса в работе вибровозбудителя; тоже самое наблюдается и на 1-м вибровозбудителе).

Рис. 8. Сигнал с левой каретки 5 Гц, измеренный лазерным датчиком

Рис. 9. Сигнал с левой каретки 1 Гц, лазерным датчиком

а)

б)

в)

Рис.10: а) Сигнал перемещения 2-го вибровозбудителя при сигнале с генератора 10 Гц, б) отключение от упругой системы (ленты с шариками), в) сигнал перемещения, увеличенный в зоне реверса

На рис. 11 представлен сигнал перемещения 2-го вибровозбудителя (2 – й каретки) с подключенной упругой системой (ленты с шариками), а на рис. 16 спектр этого сигнала.

Рис. 11. Сигнал перемещения на 2-й каретке 10Гц с подключением упругой системы (ленты с шариками).

Рис. 12. Спектр сигнала перемещения (рис. 11) полученного с помощью программ в среде Matlab: а) программа p12.m, б) программа p13.m.

Текст программы p12.m:

```
%сигнал перемещение-время, спектр;
f1=1000.0;
[m,n]=size(S1);
x=1:m;
y=x;
for n=1:m
y(1,n)=S1(n,1)-S1(1,1);
end
x1=x/f1;
plot(x1,y);
pause
Y=fft(y,1024);Pyy=Y.*conj(Y)/1024;
f=1000*(0:150)/1024; plot(f,Pyy(1:151)),grid;
```

Текст программы p13.m:

```
Fs = 1000;
L = length(S1); %5001 для x-x h400-1.csv
NFFT = 2^nextpow2(L); %количество линий Фурье-спектра
Y = fft(S1, NFFT);
%Y = 2 * Y./L; %нормировка по амплитуде - из примера Matlab
%Y = 2 * Y./NFFT; %нормировка по амплитуде - из примера FScr.m
Y = Y./NFFT; %нормировка по амплитуде аналогично в ПО Renishaw
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); %массив частот
plot(f, 2*abs(Y(1:NFFT/2+1)));
%semilogy(f, 2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
```

Методика отображения сигнала с лазерного датчика ILD1320-10 в среде Matlab следующая.

С помощью матобеспечения ф. MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG, установленного в ноутбуке, сигнал, поступающий от конвертера IF2001/USB (рис. 4), преобразуется в Excel - файл, например, Sampl001.csv (расширение ф. MICRO-EPSILON

MESSTECHNIK GmbH). Excel – файл легко импортируется в среду Matlab и переименовывается в матрицу S1, с которой работают программы p12.m и p13.m. Как видно из рис. 12, определение частоты колебаний с помощью программы p13.m точнее, чем с помощью программы p12.m.

Определение 1-й собственной частоты колебаний упругой системы «ленты с шариками в натянутом состоянии». На рис. 13 представлена схема направлений колебаний шарика и кусочка ленты, на котором он закреплён с помощью пайки.

Рис. 13. Схема направлений свободных колебаний шарика на ленте

Предварительные исследования показали, что в упругой системе наблюдаются следующие свободные колебания:

- 1) поперечные изгибные в направлении оси Y, собственные колебания f_{cy} ,
- 2) поперечные изгибные в направлении оси Z, собственные колебания f_{cz} ,
- 3) крутильные вокруг оси X, собственные колебания f_{cA}

Собственные изгибные колебания f_{cy} в направлении оси Y. Измерения проводились на ленте (в середине) между шариками № 5 и № 6. Нагружение упругой системы осуществлялось натягом в 2 мм между шариком № 5 и упором (вставлением пластины толщиной 2 мм). Освобождение системы от нагрузки осуществлялось резким движением пластины вверх. Лента с шариками при этом совершала наложенные друг на друга поперечные изгибные и крутильные колебания. Временной сигнал перемещения точки измерения на ленте представлен на рис. 14, а спектр сигнала на рис. 15.

Здесь: 1-я собственная частота изгибных колебаний вблизи $f_{cy} = 7,813$ Гц и 1-я собственная частота крутильных колебаний вблизи $f_{cA} = 9,766$ Гц.

Было проверено, насколько изменяются собственные частоты, если изменить жесткость упругой системы путем зажатия шариков № 1 и № 10 в упорах, как это показано на рис. 15.

Рис. 14. Сигнал с лазерного датчика из середины ленты между шариками № 5 и № 6: а) затухающие свободные колебания, б) увеличенный фрагмент сигнала, в) спектр собственных частот колебаний ленты с шариками (программа p12.m).

Рис. 15.

Временной сигнал свободных колебаний упругой системы повышенной жесткости представлен на рис. 16, а), и спектр сигнала на рис. 16, б). Принципиально характер колебаний не изменился, а изменились частоты, стали более высокими $f_{cy} = 9,706$ Гц, $f_{cA} = 12,7$ Гц).

Собственные изгибные колебания f_{cz} в направлении оси Z. Измерения проводились на шарике № 5 сверху. Общий вид измерений на стенде показан на рис. 17.

Нагружение упругой системы осуществлялось путем оттягивания ленты двумя пальцами вверх (вдоль оси Z) и резкого отпускания (разжатия пальцев). Лента с шариками совершает затухающие колебания, шарик совершает сложное пространственное движение, близкое к движению по эллипсу «на глаз».

При рассмотрении движения с помощью стробоскопического фонаря наблюдались изгибные колебания вдоль Z и крутильные A вокруг оси X. На рис. 18, а) представлен временной сигнал свободных колебаний в направлении оси Z, на 18, б) увеличенный

фрагмент рис. 18, а), на рис. 18, в) спектр по программе p12.m и на рисю 18, г) спектр по программе p13.m.

Рис. 16. Свободные колебания «ужесточённой упругой системы»: а) временной сигнал, б) спектр сигнала

Рис. 17. Общий вид измерений собственных колебаний f_{cz} в направлении оси Z

Рис. 18. Собственные колебания при нагружении в направлении оси Z

Таким образом, наблюдаются изгибные собственные колебания в направлении оси Z $f_{cz} = 11,72- 11, 93$ Гц и крутильные собственные колебания вокруг оси X, $f_{cA} = 9,46 - 9,77$ Гц.

Собственные крутильные колебания f_{cA} вокруг оси X. Измерения проводились на ленте в середине между шариками № 5 и № 6. Нагружение осуществлялось путем поворота ленты вокруг оси X от руки и от руки резкое освобождение. Лента с шариками совершала наложенные друг на друга поперечные изгибные вдоль оси Y и крутильные колебания вокруг оси X. Временной сигнал представлен на рис. 19, а), на рис. 19, б) – фрагмент рис. 19, а), на рис. 19, в) спектр по программе p12.m и на рис. 19, г) спектр по программе p13.m.

Амплитуда, мм $\times 10^{-2}$

в)

Амплитуда, мм

г)

Рис. 19. Собственные крутильные колебания вокруг оси X

Наблюдаются изгибные собственные колебания в направлении оси Y, $f_{cy} = 6,836 - 7,202$ Гц и крутильные собственные колебания вокруг оси X, $f_{cA} = 9,491 - 9,77$ Гц

Обобщая представленные результаты, можно утверждать, что свободные колебания ленты с шариками происходят около следующих частот:

$f_{cy1} = 6,836$ Гц, $7,202$ Гц, $7,813$ Гц, (средняя $f_{cy1} = 7,2837$ Гц),

средняя $f_{cy2} = 14,5674$ Гц,

средняя $f_{cy3} = 21,8511$ Гц,

средняя $f_{cy4} = 29,1348$ Гц,

$f_{cz1} = 11,72$ Гц, $11,93$ Гц, (средняя $11,825$ Гц),

средняя $f_{cz2} = 23,65$ Гц,

средняя $f_{cz3} = 35,475$ Гц,

средняя $f_{cz4} = 47,3$ Гц,

$f_{cA1} = 9,491$ Гц, $9,77$ Гц, (средняя $9,6305$ Гц)

средняя $f_{cA2} = 19,261$ Гц,

средняя $f_{cA3} = 28,8915$ Гц,

средняя $f_{cA4} = 38,522$ Гц,

Список литературы

1. В.К. Асташев, В.Л. Крупенин, А.Н. Тресвятский. Экспериментальное исследование синхронизации ударов в распределенных системах с параллельными ударными парами // ДАН. - 1996. - т. 351, №1. - С. 44 – 47. [Электронный ресурс] URL: <http://www.mathnet.ru/links/45c615c740d549dac6c437d58b9f5fa3/dan50211.pdf> (дата обращения: 23.10.2020).
2. 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.
3. 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.

4. V.L. Krupenin. Vibro-Impact Processes in Systems with Large Number Impact Pairs and Distributed Impact Elements // Dynamics of vibro-impact systems. Euromech Colloquium 386. September, 1998. Loughborough University, England, 1998.
5. Babitsky V.I., Krupenin V.L. Vibration of Strongly Nonlinear Discontinuous Systems. – Springer, 2001. – 330 p.
6. Крупенин В.Л. О развитии методов частотно-временного анализа для расчета составных систем с большим числом ударных пар // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – №6. – С.40-51.
7. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Эксперименты с протяженными виброударными системами (резонансные движения) // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 7 (35). – С. 3-10. URL: [http:// www.vntr.ru](http://www.vntr.ru). (дата обращения: 06.11.2019).
8. Крупенин В.Л., Серков Н.А. и Пась О. В. Экспериментальный стенд для исследования динамических эффектов в системах со многими ударными парами // Вестник научно-технического развития. – 2019. – № 12(148). – С.11-16. URL: [http:// www.vntr.ru](http://www.vntr.ru) (дата обращения: 17.10.2020).

Дата поступления: 31 октября 2020 г.