

УДК 621.01

В.И.КАРАЗИН, С.В.КОЛЕСНИКОВ, С.Д.ЛИТВИНОВ, А.А.СУХАНОВ, И.О.ХЛЕБОСОЛОВ

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ВИБРОУДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

### 1. Назначение и технические требования

Виброударные воздействия воспроизводятся на виброударных механических стендах (ВУМС), предназначенных для проведения испытаний различных устройств на прочность при механических вибрациях вдоль заданного направления [1-3, 7]. ВУМС должен обеспечить воспроизведение следующих основных характеристик виброударного воздействия: диапазон воспроизводимых частот: 100 – 5000 Гц; пиковые значения ускорения: 1000 – 20000 м/с<sup>2</sup>; ударный спектр (УС – максимальная по модулю реакция пробного линейного осциллятора с собственными частотами 0 – 5000 Гц и добротностью  $Q=5$  на формируемое стендом ударное воздействие) должен располагаться в заданных пределах (между пунктирными красными линиями на рис.1) с допуском неравномерности  $\pm 30\%$  от среднего значения (сплошная синяя линия).

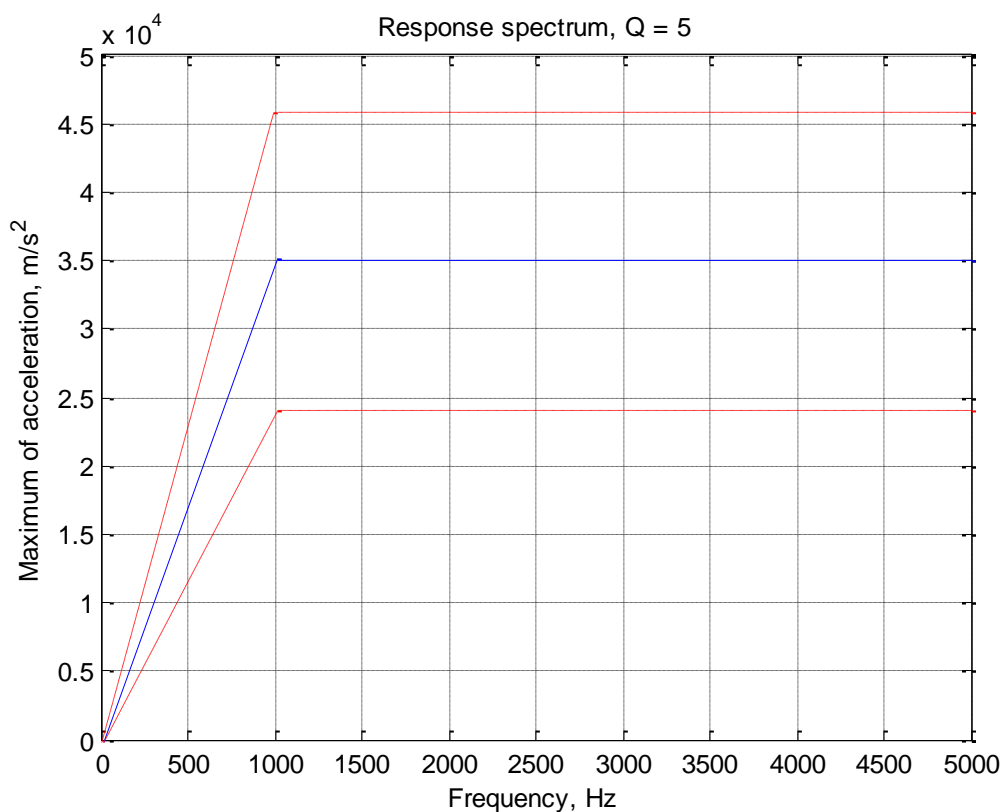


Рис. 1. Заданный ударный спектр

### 2. Малогабаритный виброударный механический стенд (МВМС)

Поскольку регламентируемые диапазоны частот и ускорений достаточно широки, процесс разработки и изготовления стенда был разделен на два этапа. Первый этап был посвящен разработке и изготовлению малогабаритного виброударного механического стенда (МВМС), основное назначение которого состояло в отработке главных концепций и принципов построения многофункционального и широкодиапазонного механического стенда.

При этом параметры МВМС были подобраны таким образом, чтобы помимо научно-исследовательского интереса он мог бы проводить реальные механические испытания малогабаритных приборов до 0.5 кг в относительно небольшом частотном диапазоне при уменьшенных значениях воздействующих ускорений.

### 2.1. Конструкция МВМС

В результате предварительных исследований в качестве основного элемента виброударного механического стенда был выбран механически возбуждаемый резонатор, выполненный в виде трех подвижных и одного неподвижного кольца, соединенных болтами в единую конструкцию при помощи двух упругих круглых мембран. Испытуемое изделие устанавливается на стол, закрепленный на внутреннем кольце. Возбуждение резонатора осуществляется в результате соударения внешнего кольца о неподвижную поверхность (рис. 5). Данная схема [4] имеет принципиальные отличия от широко известных ударных стендов [5].

Основные массово-габаритные характеристики резонатора МВМС следующие: диаметр - 400 мм; высота - 98 мм; масса - 32 кг.

### 2.2. Модальный анализ МВМС

Предварительный выбор параметров резонатора (высота, толщина, диаметр колец, толщина мембран и т.д.) осуществляется размещением собственных частот колебаний резонатора в заданном испытательном диапазоне частот. Для этого был произведен конечно-элементный компьютерный модальный анализ резонатора в системе *Ansys*. Результаты моделирования для первых трех основных форм колебаний представлены на рис. 2-4.

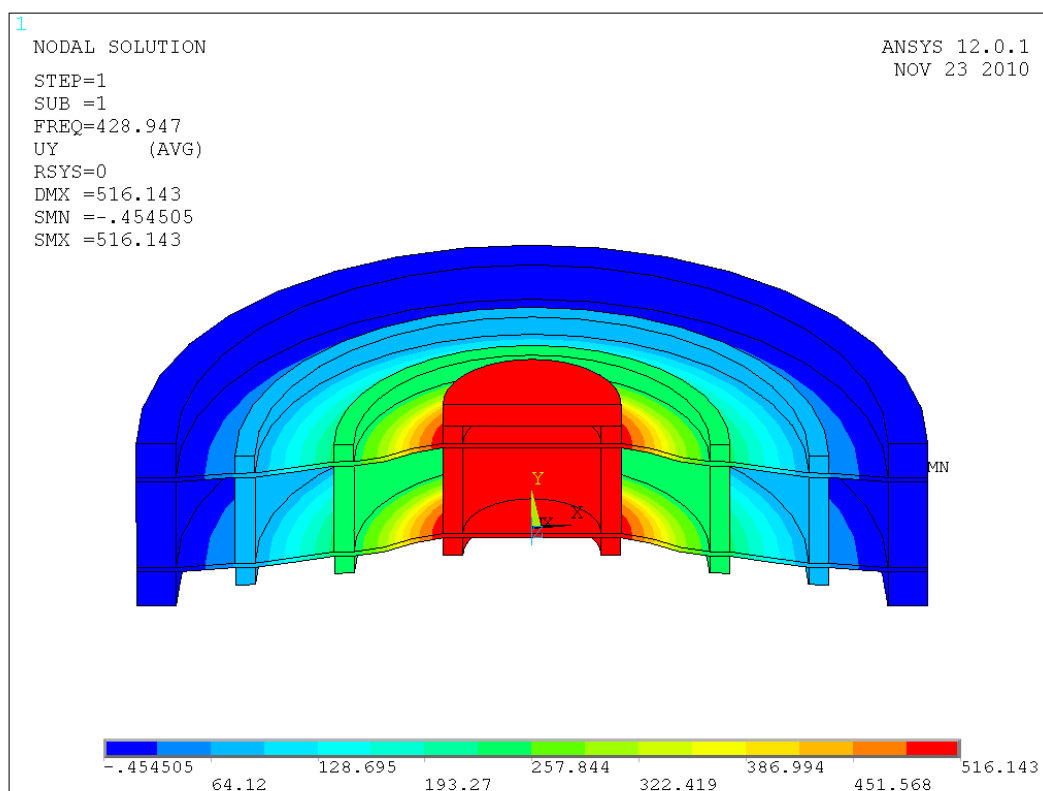
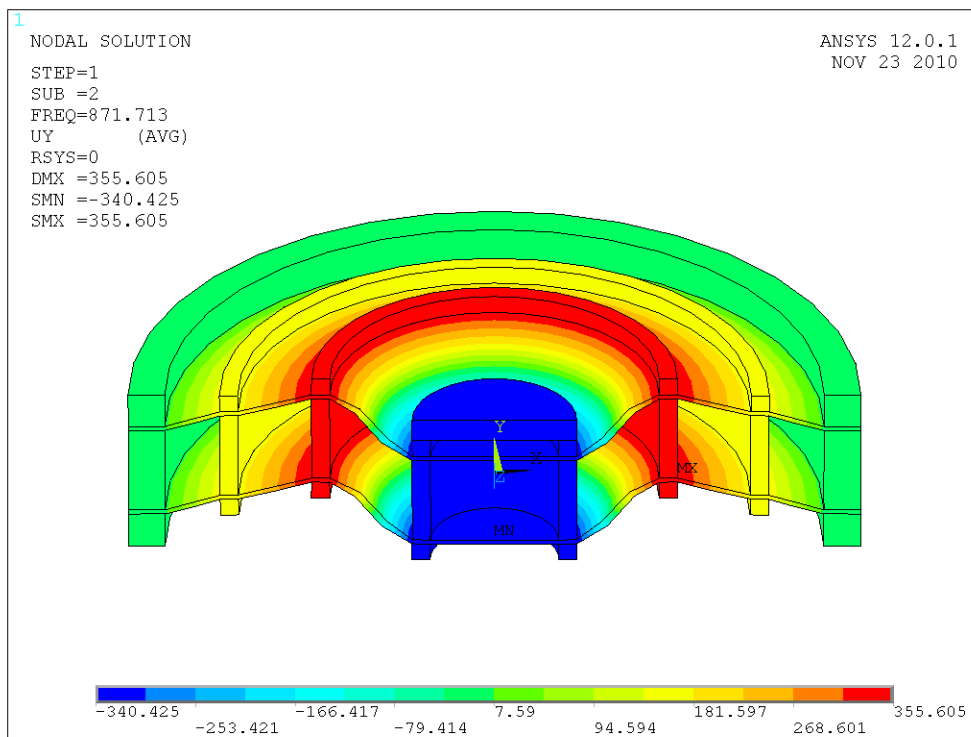
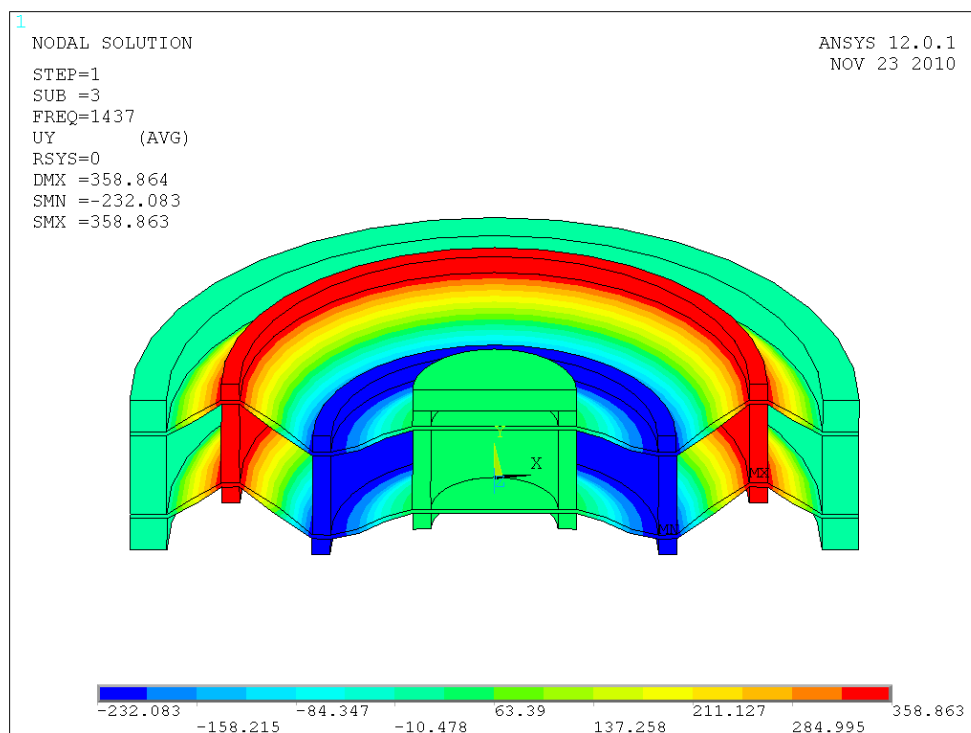


Рис. 2. МВМС. Первая форма колебаний. Частота 429 Гц



*Рис. 3. МВМС. Вторая форма колебаний. Частота 872 Гц*



*Рис. 4. МВМС. Третья форма колебаний. Частота 1437 Гц*

### 2.3. Возбуждение колебаний

Для реализации полигармонических колебаний рабочего стола в заданном диапазоне частот необходимо широкополосное внешнее возбуждение. Наиболее простым и естественным способом такого возбуждения является механическое ударное воздействие, обладающее широким спектром содержащихся в нем частот (хотя не исключены и другие системы возбуждения: гидравлические, пневматические и т.п.). При этом в качестве источника энергии удобно использовать потенциальную энергию самого резонатора. Предлагаемая система возбуждения (СВ), обеспечивающая стабильность результатов и возможность регулировки уровня воспроизводимого ускорения, представлена на рис. 5.

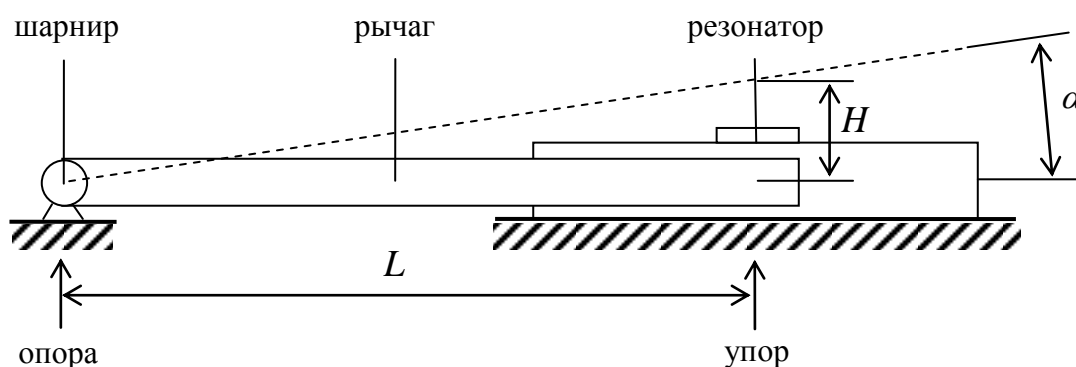


Рис. 5. Система возбуждения

Длина рычага  $L$  выбирается таким образом, чтобы максимальный угол подъема резонатора  $\alpha$  не превышал  $15 - 20^\circ$ . Работает СВ следующим образом. Резонатор поднимается на требуемую высоту  $H$  и отпускается. При соударении резонатора с упором возбуждаются все формы колебаний стенда. Работоспособность такой схемы возбуждения во многом определяется качеством упора. Материал и конструкция упора должны обеспечить плотное и одновременное прилегание к резонатору в момент удара и исключить отскок резонатора. При этом упор должен быть достаточно жестким. Рычажно-шарнирный механизм подъема резонатора призван обеспечить стабильность результатов и возможность регулировки уровня воспроизводимого ускорения.

Максимально необходимую высоту подъема резонатора  $H$  можно оценить из формул:

$$V = \sqrt{2gH}, \quad W = V\omega, \quad (1)$$

где  $V$  - амплитуда скорости,  $W$  - амплитуда ускорения,  $\omega$  - круговая частота колебаний,  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения. Откуда при отсутствии потерь на трение

$$H = \frac{W^2}{2g\omega^2}. \quad (2)$$

При средних значениях ускорения и частоты  $W = 10000 \text{ м/с}^2$ ,  $f = 1500 \text{ Гц}$  имеем

$$H = \frac{10^8}{2 \cdot 9.81 \cdot 4\pi^2 \cdot 1500^2} = 5.7 \text{ см.} \quad (2)$$

С учетом неизбежных потерь и перераспределения энергии для обеспечения среднего требуемого уровня вибрации высота подъема резонатора была выбрана в пределах 10 – 20 см.

#### 2.4. Динамический анализ МВМС

Окончательная доводка конструкции и корректировка параметров резонатора осуществляются на основании моделирования вынужденных колебаний при «падении» резонатора с заданной высоты. При этом, конечно, никакого падения резонатора не происходит. Просто решается задача Коши о свободных колебаниях при закрепленном внешнем кольце и начальных скоростях всех остальных точек модели в соответствии с формулой (1). Физически это полностью соответствует моделированию реального падения резонатора с высоты  $H$ .

Динамический анализ работы МВМС осуществлялся также в системе *Ansys*. Обработка результатов моделирования производилась в пакете *Matlab* при помощи разработанных программ спектрального анализа и определения ответного (ударного) спектра [6]. На рис. 6–8 представлены результаты компьютерного динамического анализа при высоте «падения» резонатора 10 см.

На рис. 6 представлено вертикальное ускорение центральной точки стола. На рис. 7 представлен спектр Фурье полученного ускорения. На рис. 8 представлен ударный спектр.

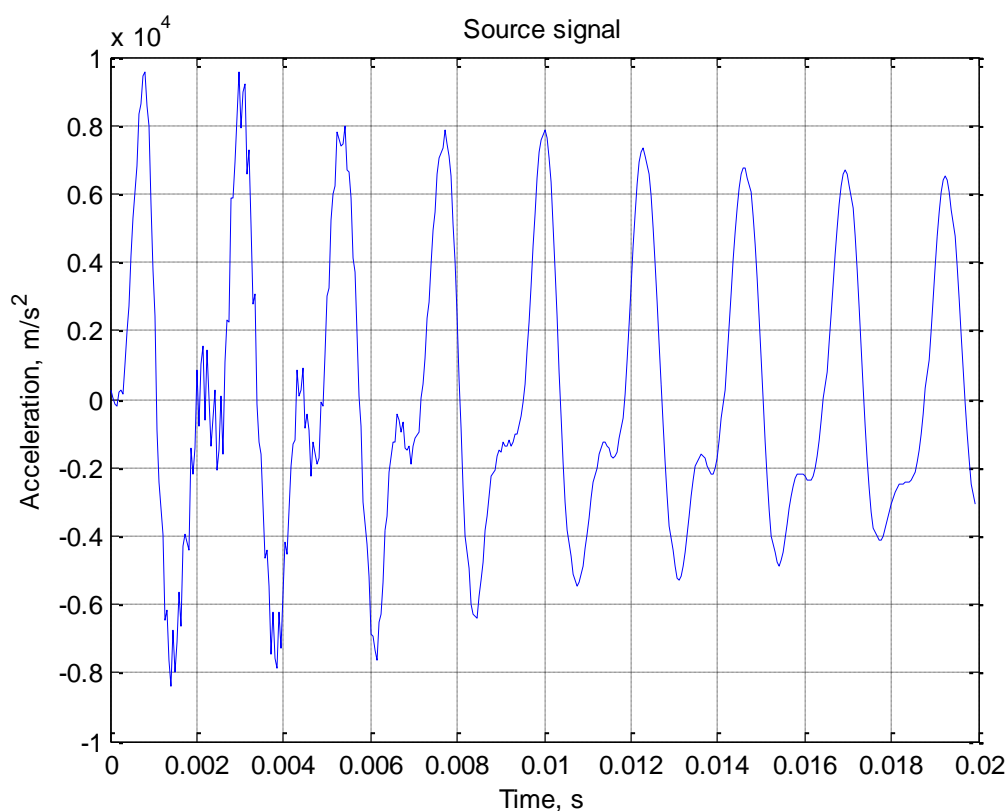


Рис. 6. Ускорение

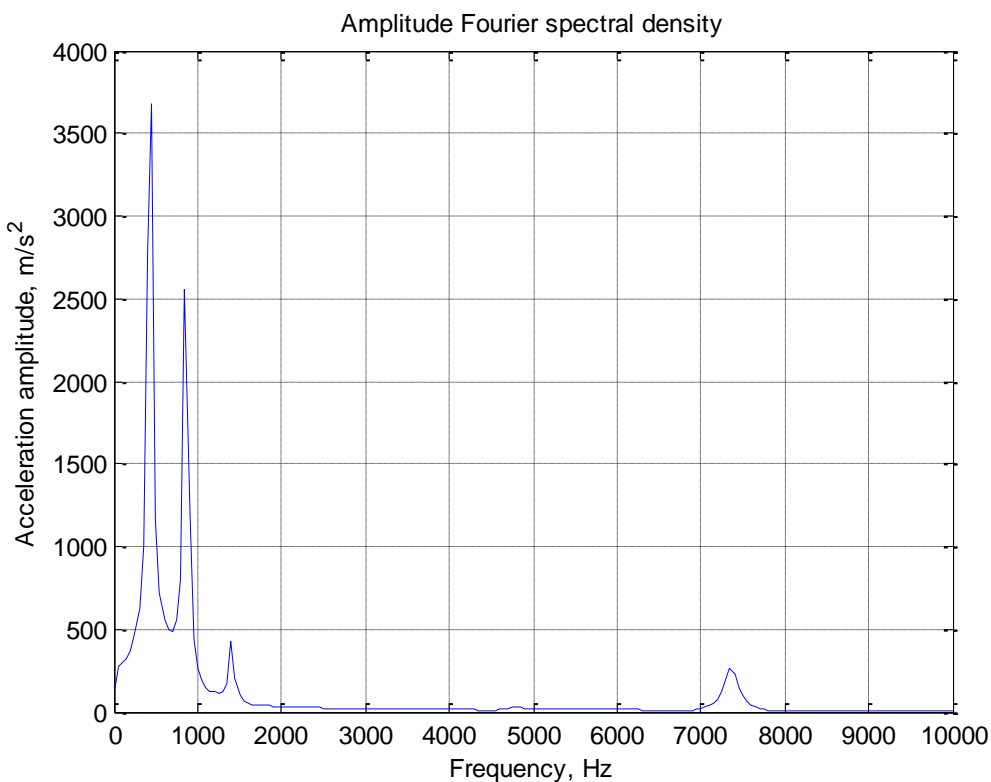


Рис. 7. Спектр Фурье по ускорению

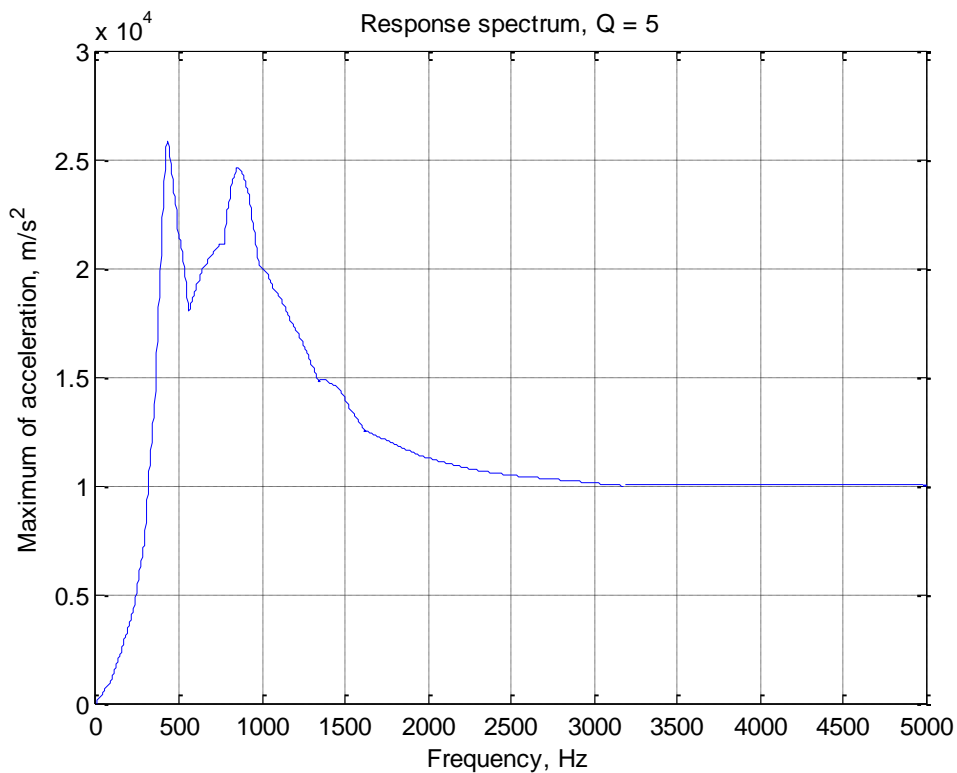


Рис. 8. Ответный (ударный) спектр по ускорению

## 2.5. Выводы по результатам моделирования МВМС

По результатам компьютерного моделирования работы МВМС можно сделать следующие выводы:

1. Пиковые значения ускорения (рис. 6) достигают средних величин  $10000 \text{ м/с}^2$ . Для получения максимальных значений ускорения  $20000 \text{ м/с}^2$  необходимо в соответствии с формулой (2) увеличить высоту падения резонатора до 40 см.
2. Ударный спектр (рис. 8) с учетом вывода 1 удовлетворяет заданным требованиям по уровню и почти удовлетворяет по допуску неравномерности  $\pm 30 \%$  от среднего значения.
3. Окончательные выводы о соответствии модели реальной конструкции, перспективности предложенных инженерно-технических реализации МВМС и метода его возбуждения, возможных дальнейших совершенствований и оптимизаций элементов конструкции МВМС можно будет сделать только после проведения натурных испытаний.

## 2.6. Натурные испытания МВМС

Внешний вид изготовленного МВМС приведен на рис. 9.



*Рис. 9. Внешний вид МВМС*

Контроль и визуализация результатов испытаний осуществлялись разработанной и поставленной Заказчиком автоматизированной системой контроля «Удар» при помощи установленных датчиков ускорений, соединенных с контрольно-измерительной аппаратурой. Результаты измерений вибрации стола при высоте падения резонатора 10 см представлены на рис. 10–12.

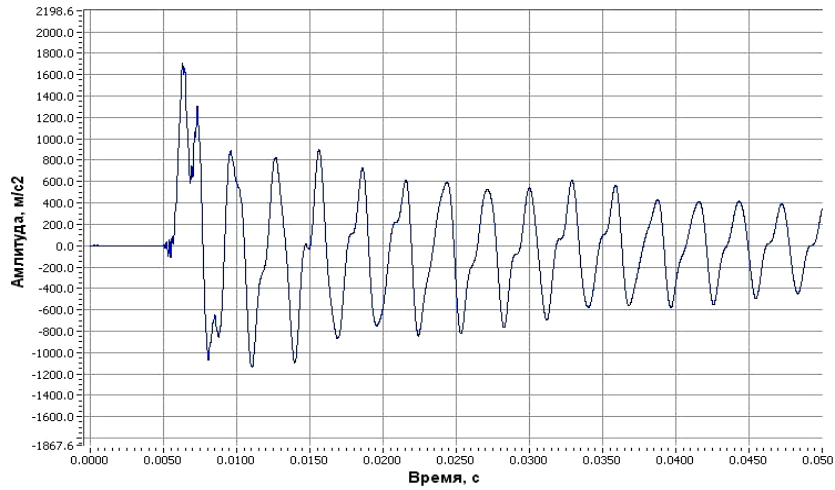


Рис. 10. Ускорение

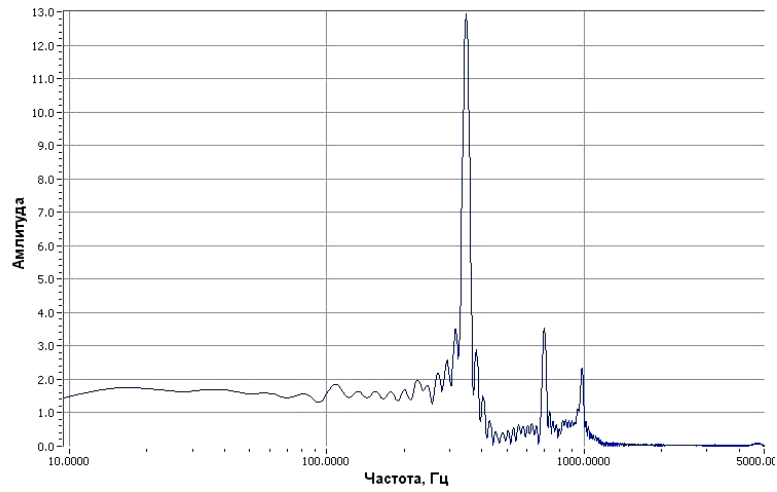


Рис. 11. Спектр Фурье по ускорению

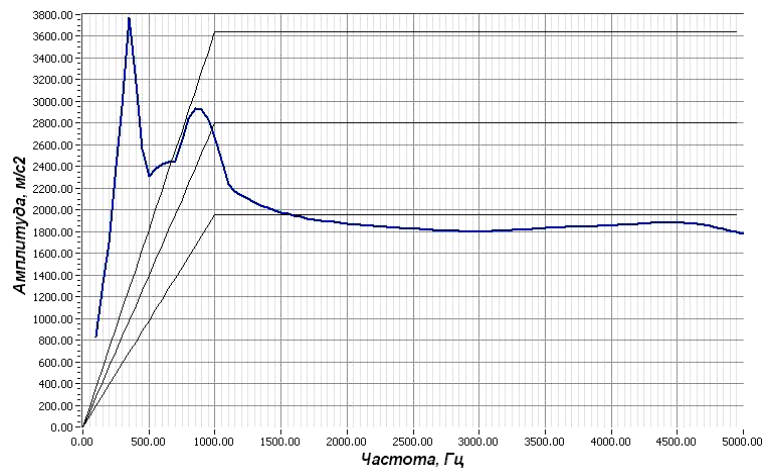


Рис. 12. Ответный (ударный) спектр по ускорению



## 2.7. Выводы по результатам испытаний МВМС

Сравнивая результаты компьютерного моделирования с натурными экспериментами, можно сделать следующие выводы:

1. Пиковые значения ускорения (рис. 10)  $1700 \text{ м/с}^2$  в 6 раз меньше полученных при компьютерном моделировании.
2. Ударный спектр (рис. 12) также соответственно в 6 раз меньше полученного при компьютерном моделировании. При этом неравномерность реального спектра несколько меньше, чем у модельного.
3. Собственные частоты колебаний также несколько ниже, чем у модели.
4. Наиболее вероятными причинами достаточно больших расхождений абсолютных значений ускорений являются, скорее всего, многочисленные стыки в болтовых соединениях и плохая и недостоверная моделируемость самих этих болтовых соединений. В модели предполагалось, что болтовые соединения являются монолитными, без проскальзывания и отрыва. В действительности болтовое соединение в данном случае ведет себя скорее как шарнир, а не заделка. Поэтому реальная конструкция получилась более мягкой и сильно задемпфированной. Отсюда и уменьшение значений пиковых ускорений, и снижение собственных частот колебаний.
5. Учитывая предыдущий вывод, большой виброударный механический стенд следует проектировать по возможности без стыковых болтовых соединений или, по крайней мере, не размещать их в ответственных местах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. /Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. - Т.4. Вибрационные процессы и машины /Под ред. Э. Э. Лавендела, 1981. - 510 с.
2. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. /Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. - Т.5. Измерения и испытания /Под ред. М.Д. Генкина, 1981. – 496 с.
3. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. /Под ред. В.В.Клюева. –М.: Машиностроение, 1982. – Кн.1, 1982. - 528 с.
4. **Яровицин В.С., Литвинов С.Д., Каразин В.И., Суханов А.А., Хлебосолов И.О.** Устройство для испытания изделий на виброударные нагрузки. ПАТЕНТ на изобретение № 2348021, 27.02.2009.
5. **Анурьев В.И.** Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т.3. – М.: Машиностроение, 1979. – 560 с.
6. **Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.И.** MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
7. **Евграфов А.Н., Каразин В.И., Хлебосолов И.О.** О разработках ротационной градуировочной и испытательной техники. Труды СПбГТУ, 2007 г. №504. С. 217-221.

## REFERENCES

1. Vibratsii v tekhnike. Spravochnik. v 6-ti t. /Red. sovet: V.N. Chelomej (pred.). - M.: Mashinostroenie, 1981. - T.4. Vibratsionnye protsessy i mashiny /Pod red. E. E. Lavendela, 1981. - 510 p.
2. Vibratsii v tekhnike. Spravochnik. v 6-ti t. /Red. sovet: V.N. Chelomej (pred.). - M.: Mashinostroenie, 1981. - T.5. Izmereniya i ispytaniya /Pod red. M.D. Genkina, 1981. - 496 p.
3. Ispytatelnaya tekhnika: Spravochnik. v 2-kh kn. /Pod red. V.V. Klyueva. -M.: Mashinostroenie, 1982. - kn. 1, 1982. - 528 p.

4. **Yarovitsin V.S., Litvinov S.D., Karazin V.I., Sukhanov A.A., Khlebosolov I.O.** Ustrojstvo dlya ispytaniya izdelij na vibroudarnye nagruzki. PATENT na izobretenie № 2348021, 27.02.2009.
5. **Anurev V.I.** Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya. v 3-kh t. T.3. - M.: Mashinostroenie, 1979. - 560 p.
6. **Anufriev I.E., Smirnov A.B., Smirnova E.I.** MATLAB 7. - SPb.: BKHV-Peterburg, 2005. - 1104 p.
7. **Evgrafov A.N., Karazin V.I., Khlebosolov I.O.** O razrabotkakh rotatsionnoj graduirovochnoj i ispytatelnoj tekhniki. Trudy SPbGTU, 2007 g. № 504. Pp. 217-221.

*Поступила в редакцию 03.04.2013  
После доработки 30.04.2013*