

УДК 621.647.23

Исаенко С.В.  
ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург, Россия

## АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА МАНИПУЛЯЦИОННУЮ СИСТЕМУ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ВЫВЕДЕНИИ НА РАКЕТЕ-НОСИТЕЛЕ

Isaenko S.

Department of robotic system design Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,  
Saint-Petersburg, Russia ([isaenko.sv@gmail.com](mailto:isaenko.sv@gmail.com))

### ANALYSIS OF VIBRATION LOADS TO SPACE MANIPULATION SYSTEM BY THE CARRIER ROCKET

*Аннотация.* Одна из категорий обеспечения надёжности робота - механическая прочность. Робот должен быть устойчив к различным воздействиям, направленным на его разрушение, например возникновению некой аварийной ситуации или непреднамеренному воздействию человека. В случае с космическими робототехническими системами так же необходимо обеспечить устойчивость к серьёзным вибрационным нагрузкам, возникающим при взлёте и посадке. Одним из способов установить способность робота противостоять вибрационным нагрузкам является проведение испытаний на вибростенде. Однако в случае неудачи на этапе вибрационных испытаний требуются значительные временные и финансовые затраты на изменение конструкции робота, восстановление повреждённых деталей и повторное проведение испытаний. Избежать этого можно при проведении вибрационного моделирования в процессе конструирования робота. Моделирование выявляет наиболее уязвимые в механическом смысле детали и позволяет разработчикам своевременно внести изменения в конструкцию. В статье рассмотрена работа по вибрационному моделированию манипуляционной системы космического назначения, на примере которой показаны результаты расчётов, графики и карты распределения поверхностных напряжений.

*Ключевые слова:* моделирование; космическая робототехника; вибрации; колебания

#### Введение

Аппаратуре космического назначения предъявляются специфические требования по сопротивлению вибрационным нагрузкам, возникающим на этапе прохождения ракетой-носителем плотных слоёв атмосферы. Для проверки разработанного изделия на работоспособность при воздействии различных негативных факторов принято проводить ряд испытаний - в термокамере, центрифуге, на вибрационном стенде и так далее. Для проверки на конструктивную прочность при вибрационном воздействии проводится серия испытаний на вибростенде: изделие фиксируется так, как оно будет зафиксировано в ракете-носителе, и подвергается вибрациям по трём осям одновременно в исследуемом диапазоне частот (обычно от 0 Гц до 2000 Гц или от 0 Гц до 3000 Гц). С установленных в различных частях конструкции акселерометров поступает информация о возникающих в конструкции виброускорениях. Так формируется механическая амплитудно-частотная характеристика, которая показывает резонансные частоты конструкции и максимальные уровни виброускорения, возникающие в ней.

#### Постановка задачи

Несмотря на развитую методологию проведения испытаний, вибрации взлетающей ракеты носят случайный характер. Для моделирования этих вибраций замерены уровни воздействия для различных диапазонов частот. Эти данные предоставляют из себя таблицы с указанием уровней спектральной плотности виброускорения по частотным составляющим. Данные из таблицы 1 предоставлены ракетно-космической корпорацией «Энергия» и показывают спектральную плотность виброускорения на различных этапах полёта ракеты-носителя «Союз».

В соответствии с ГОСТ В 24880-81 допускается замена испытаний на случайную вибрацию испытаниями на эквивалентную синусоидальную вибрацию. В испытательном отделе ЦНИИ РТК установлен вибростенд для моделирования синусоидальных вибраций. Средства космической робототехники, разрабатываемые в ЦНИИ РТК, как и большинство других разработок института проходят испытания на вибростенде. Однако, во время прохождения вибрационных испытаний изделие может быть деформировано или сломано, что повлечёт за собой дополнительные финансовые и временные затраты на реинжиниринг изделия и изготовление новых деталей.

Таблиця 1

Случай нагрузки	Спектральная плотность виброускорения							Продолжительность воздействия, с
	Частота, Гц							
	20	50	100	200	500	1000	2000	
	Спектральная плотность виброускорения, $g^2/Гц$							
Участок выведения на РН в ГрО ТГК «Прогресс-М»	0,0100	0,0100	0,0100	0,0250	0,0250	0,0125	0,0065	60
Автономный орбитальный полет в ГрО ТГК «Прогресс-М»	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0040	0,0020	0,0010	240
Орбитальный полет в составе МКС	0,00020	0,00020	0,00025	0,00025	0,00030	0,00020	0,00010	300 (за 1 год)

Современные средства компьютерного моделирования позволяют избежать возникающих при поломке затрат и, что самое главное, избежать необходимости переделывания завершённого изделия, которое оказалось недостаточно прочным для вибрационного воздействия. Начиная с этапа эскизного проектирования можно проводить экспресс-моделирование в таких программных пакетах, как SolidWorks и Pro/Engineer для определения наиболее уязвимых частей конструкции. На этапе разработки конструкции для моделирования требуются более сложные программные пакеты - Ansys, LS-Dyna, Nastran, Adams и т.д. В данной статье рассмотрено моделирование вибрационного воздействия в программной среде Ansys, так как эта среда позволяет моделировать многие виды воздействия, требуемые для моделирования на космических системах.

#### Описание проведённого эксперимента

Наряду с необходимостью моделирования некоторой ситуации с заданными начальными условиями возникает вопрос о достоверности проводимого моделирования - насколько точно мы можем предсказать распределение резонансов и уровни возникающих виброускорений? Для ответа на этот вопрос был поставлен эксперимент на простой балочной структуре, результаты которого приведены ниже.

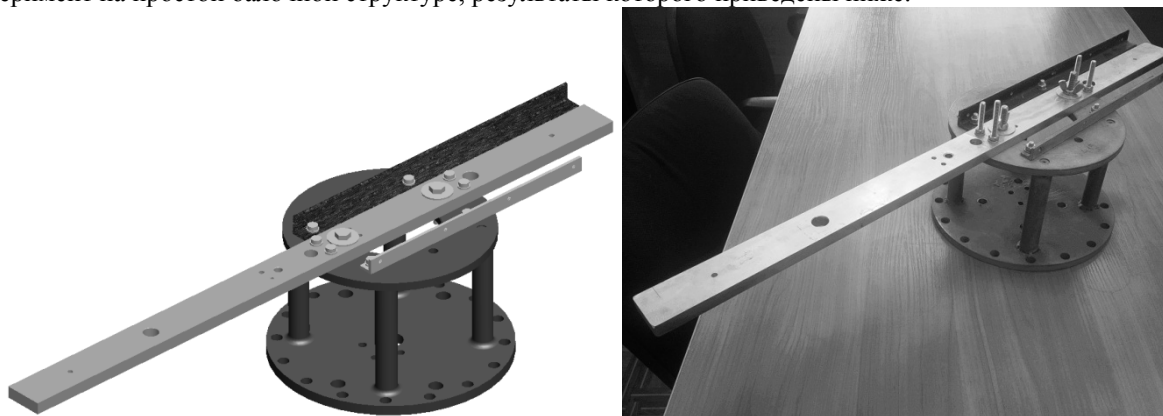


Рис. 1. Модель испытательного стенда

Конструкция была скомпонована таким образом, чтобы имелась возможность экспериментально измерить возникающие виброускорения на удалённых друг от друга частях конструкции с очевидно различающимися модулями Юнга для получения различных распределений резонансных частот. Возникающие виброускорения предполагалось измерять в шести точках, но так как на используемом в эксперименте вибрационном стенде измерение производится одновременно с четырёх акселерометров, эксперимент с одинаковым задающим воздействием проводился два раза.

При проведении вибрационных испытаний основание стенда было закреплено четырьмя болтами на задающей платформе испытательной установки. На рисунке 2 крестиками обозначены места закрепления акселерометров.

Задающим воздействием при физических испытаниях является амплитуда вибрации 1 мм в диапазоне частот от 5 до 50 Гц и амплитуда ускорения 5 г в диапазоне частот от 50 до 2000 Гц. При компьютерном моделировании задающим воздействием принималось воздействие на основание платформы постоянной амплитуды по ускорению равной 5 г в диапазоне частот от 0 до 2000 Гц.

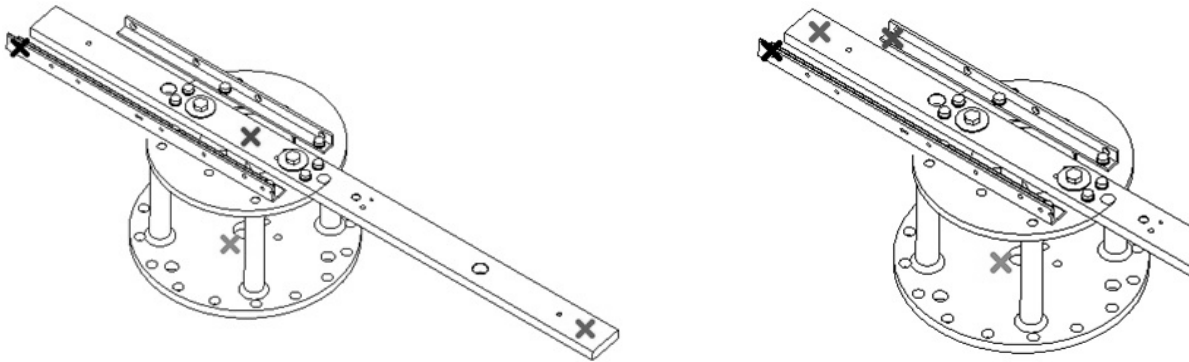


Рис. 2. Распределение датчиков в первом (слева) и втором (справа) экспериментах

Период дискретизации по частоте при компьютерном моделировании составляет 4 Гц (500 точек). Результаты моделирования в формате данных Ansys занимают 39 Гб, время моделирования на мощном персональном компьютере - около 25 минут.

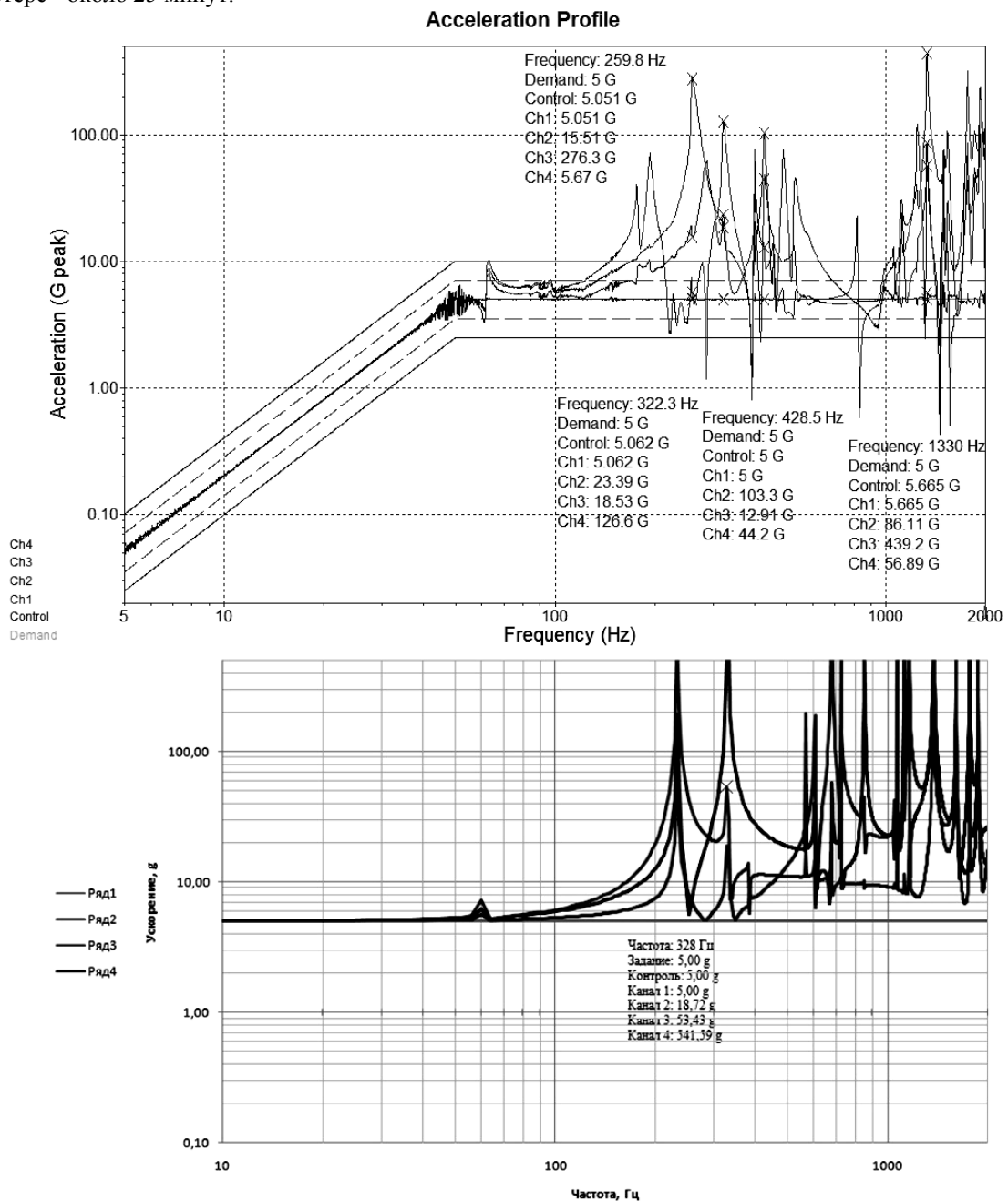


Рис. 3. Результаты испытаний (сверху) и моделирования (снизу) для первого эксперимента

На графиках физических испытаний показаны абсолютные ускорения точек конструкции в системе координат, связанной с полем тяжести земли, по трём осям координат. При компьютерном моделировании показаны относительные ускорения точек конструкции в системе координат, связанной с основанием стенда, и только по одной оси. Для актуализации расчёта в качестве результатов моделирования взяты результирующие суммы векторов амплитуд по каждой частоте для каждой точки, и к полученным значениям прибавлено 5 g для перехода в систему координат, связанную с полем тяжести земли. Кроме этого, при компьютерном моделировании учитываются лишь модули отклонений ускорений в точках, т.е. результаты компьютерного моделирования не могут быть отрицательными.

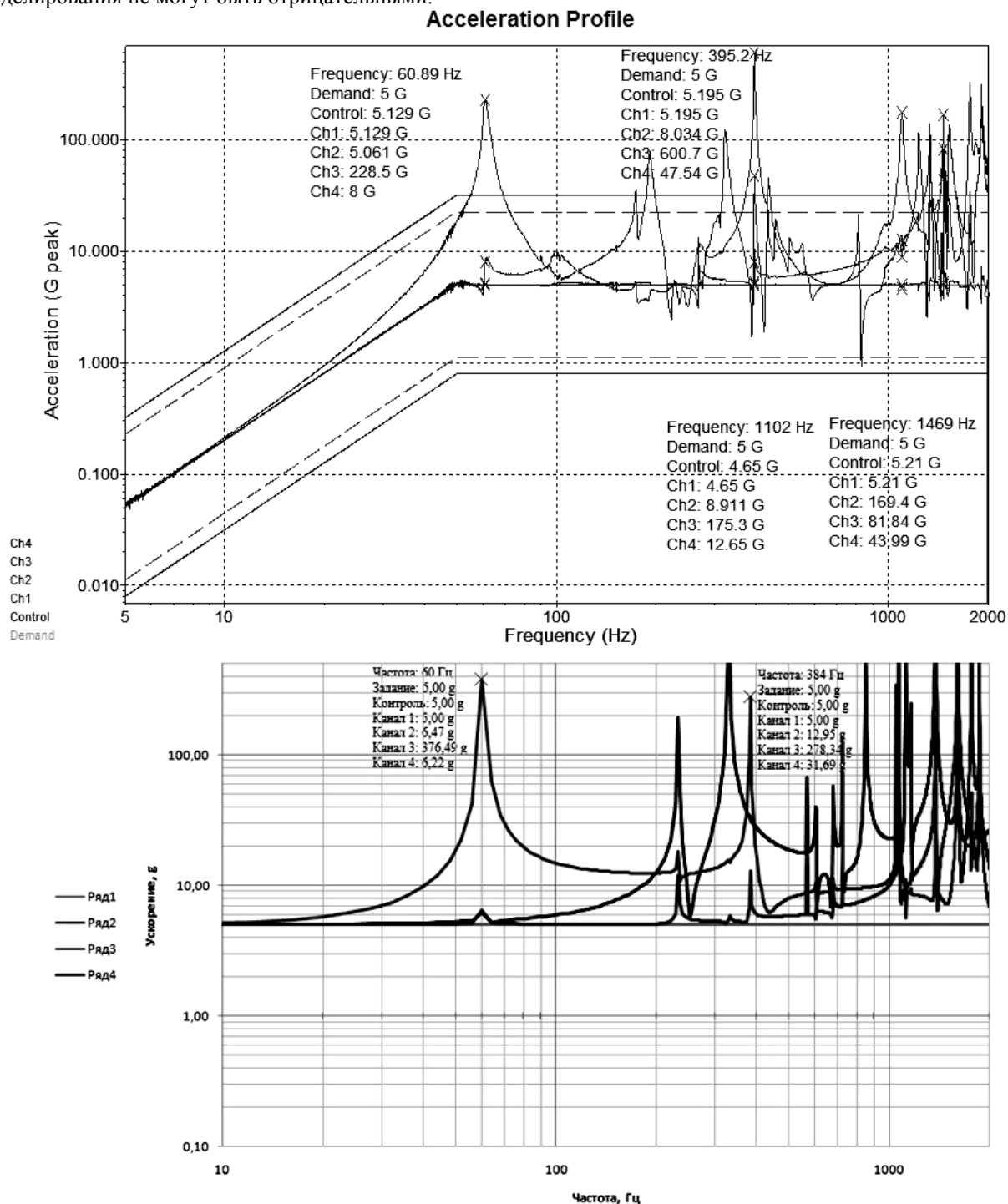


Рис. 4. Результаты испытаний (сверху) и моделирования (снизу) для второго эксперимента

Результатом проведённого эксперимента является первичное соотнесение информации, полученной при компьютерном моделировании и фактическом проведении одного и того же процесса. Целью исследований является оценка точности компьютерного моделирования вибраций простой конструкции.

Основным отличием компьютерного моделирования от реального эксперимента является идеальность компьютерного моделирования. В амплитудно-частотной характеристике, полученной в результате компьютерного моделирования показаны амплитуды вибраций на каждой частоте в установившемся режиме. В ходе эксперимента наоборот процесс подачи вибрационного воздействия является непрерывным и все виброускорения, возникающие на каждой частоте, суть суммы задающего вынужденного воздействия со стороны испытательной установки и затухающих колебаний предыдущих частот. Основным следствием этой разницы является уменьшение амплитуды вибраций в резонансах при физических испытаниях, и чем быстрее меняется частота, тем более сглаженными получаются пики. Иначе говоря, конструкция не успевает начинать вибрировать с максимальной амплитудой на какой-либо резонансной частоте, так как происходит постоянная перестройка частоты задающего воздействия, следовательно, уход с пика резонанса.

Подробнее описать происходящие явления можно, прибегнув к общей физике. В разделе вынужденных колебаний рассматривается задача динамики заделанного стержня при подаче со стороны основания гармонического воздействия. В линейной модели стержень будет совершать колебания с постепенно увеличивающейся амплитудой и частотой задающего воздействия. Ключевым свойством здесь является то, что на максимальную амплитуду вибрации стержень выходит постепенно (рисунок 5). Именно это свойство позволяет сделать заключение о срезании пиковых амплитуд при прохождении резонансов на вибростенде.

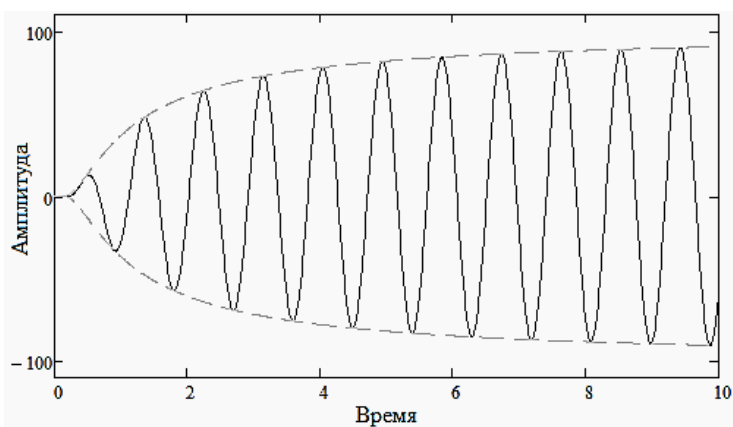


Рис. 5. Схема колебаний упругого стержня

Другими словами, когда исследуемая балочная конструкция (рисунок 1), находящаяся на вибростенде, подвергается гармоническому воздействию на частоте, являющейся резонансной для одной из частей конструкции, максимальная амплитуда резко возрастает. Но до того, как конструкция начнет вибрировать с максимально возможной амплитудой, происходит перестройка частоты задающего воздействия и снижение максимальной амплитуды. В связи с этим, в результате эксперимента мы получаем наиболее точные данные там, где скорость прохождения по частотной

шкале минимальна - в области низких частот.

Несмотря на принципиальные отличия между моделированием и экспериментом, частотные портреты, полученные при испытании и моделировании очень близки. На низких частотах (до 100 Гц) резонансные частоты всех частей конструкции совпадают полностью. Выше 100 Гц начинаются незначительные расхождения в частотах, однако в большинстве случаев распределение резонансов очень близко. Наибольшим отличием в диапазоне от 100 до 500 Гц является отсутствие в результатах физических испытаний резонанса на частоте 232 Гц, который был получен при компьютерном моделировании. Обратного несоответствия не наблюдается - все резонансы, полученные при испытании на вибростенде, с некоторой точностью были предсказаны при компьютерном моделировании.

В частотах от 500 до 1000 Гц наблюдаются несоответствия между компьютерным моделированием и результатами испытаний. Основное отличие заключается в отсутствии на результатах физических испытаний некоторых групп резонансов, предсказанных при компьютерном моделировании. Это вероятнее всего вызвано тем, что узкие полосы всплесков амплитуд теряются на фоне переходных процессов. Такие резонансы не представляют опасности для конструкции, так как возникают только при продолжительном монохроматическом воздействии, что в реальности практически невозможно.

На частотах от 1000 Гц до 2000 Гц результаты моделирования и испытаний малоразличимы. Для сравнения компьютерного моделирования и реальных процессов в этом диапазоне требуются дополнительные исследования.

В целом, соответствие частотных портретов конструкции можно охарактеризовать как наиболее точное в области низких частот. Однако это связано скорее не с методологией компьютерного расчёта, а со скоростью прохождения частот на вибростенде, которая в области низких частот минимальна. Есть основания полагать, что при уменьшении скорости прохождения частотной шкалы на вибростенде результаты эксперимента и моделирования будут сближаться до тех пор, пока не начнёт проявляться разница, вызванная линейностью компьютерного моделирования.

#### **Применение вибрационного моделирования на этапе конструирования**

Наработки, полученные в результате описанного выше эксперимента были применены к реальной робототехнической системе. В Ansys была загружена модель разрабатываемой манипуляционной системы

космического назначения и проведено моделирование вибрационного воздействия. Моделирование проводилось с амплитудой ускорения 1 g и в диапазоне частот от 0 до 300 Гц. Период дискретизации по частоте при компьютерном моделировании составляет 3 Гц (100 точек). Результаты моделирования в формате данных Ansys занимают свыше 100 Гб, время моделирования на мощном персональном компьютере превышает 10 часов.

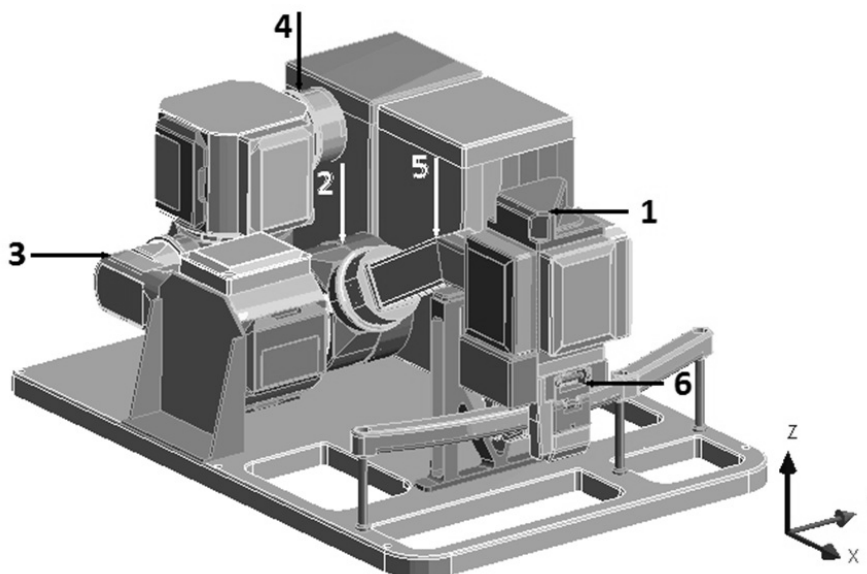


Рис. 6. Модель специализированной манипуляционной системы

На рисунке 6 показана компьютерная модель специализированной манипуляционной системы и указаны точки, в которых проводилось измерение возникающих виброускорений. В результате моделирования получены графики распределения резонансов различных частей конструкции, и представляющие гораздо большую техническую ценность карты распределения поверхностных напряжений в конструкции.

#### АЧХ точек СМС при задающей вибрации по оси X

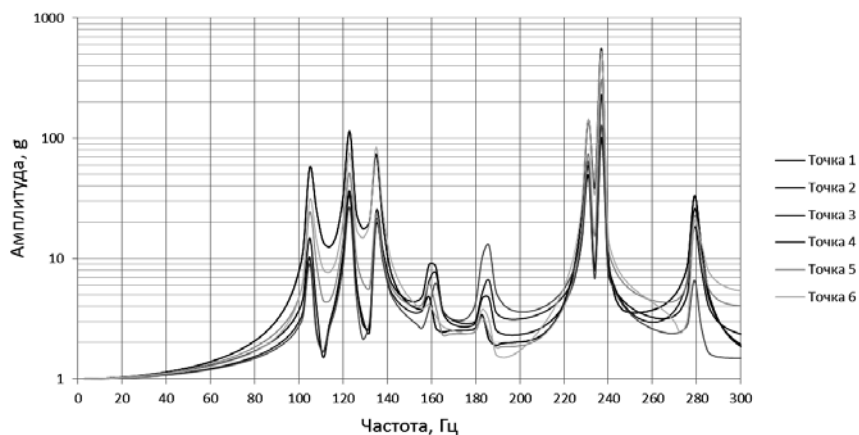


Рис. 7. Распределение резонансов по частотной шкале при воздействии по оси X

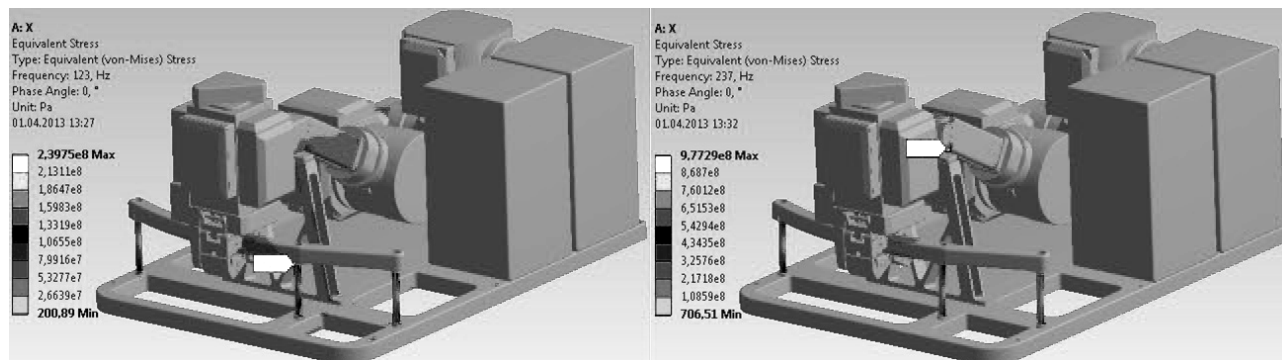


Рис. 8. Распределение максимальных поверхностных напряжений при резонансе на частоте 123 Гц (слева) и 237 Гц (справа)

Информация о наиболее уязвимых к вибрационному воздействию частях конструкции представляет особый интерес на этапе проектирования, так как позволяет заранее устранить выявленные недостатки в конструкции.

#### **Заключение**

Наибольший интерес при проектировании нового изделия представляет указание слабых в механическом смысле деталей конструкции. Однако, если достоверность моделирования недостаточна, то пользы от него не будет никакой. Проведённый эксперимент позволяет сказать, что для простой балочной структуры можно получить достаточно точные результаты моделирования в программе Ansys. При моделировании вибраций сложной системы пока нельзя однозначно сказать, насколько точно указаны частоты резонансов. В будущем предполагается провести полноценное моделирование специализированной манипуляционной системы в полном диапазоне частот на суперкомпьютере.

Однако, распределение резонансов не так важно, как карта распределения поверхностных напряжений. Из общих соображений ясно, что деформации, полученные при моделировании, близки к реальным по направлениям изгиба деталей, но достоверно преувеличены по перемещениям. Для выяснения соотношений между моделированием и экспериментом по возникающим в конструкции деформациям планируется использовать результаты моделирования на суперкомпьютере. Эти результаты можно соотнести с результатами прохождения изделия испытаний на вибростенде, когда манипуляционная система будет изготовлена. При сопоставлении результатов методика выполнения компьютерного моделирования будет уточнена и дополнена для возможности проведения более точного моделирования вибрационных испытаний до начала изготовления.

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

***Abstract.** One of the categories of ensuring robot reliability - mechanical strength. The robot must be resistant to a variety of impacts, aimed at its destruction, for example any emergency situation or inadvertent influence of the person. In case of space robotic systems also need to sustain the severe vibration stresses arising at launch and landing. One way to check robot to withstand vibration stresses - testing on a vibration table. However, breakage during vibration testing requires considerable time and financial expenses for redesign the robot, restoration of damaged parts and re-testing. This can be avoided by pre-conducting vibration simulation. Modeling identifies the most vulnerable in the mechanical sense of detail and allows engineers the opportunity to make timely changes to the project. This report highlight the work of the vibration simulation of space manipulation system, show the results of calculations, schedules and distribution charts of surface stresses. Vibrational modeling is an important condition for creating high-quality products and can save considerable resources in development and manufacturing of systems for space purposes. Development of methods for evaluation of vibration disturbances on products designed to operate in space is of great interest for the creators of such technology.*

***Keywords:** modeling; space robots; vibration*

#### **Библиографический список использованной литературы**

1. Буряка В.А., Инженерный анализ в Ansys Workbench. Самарский государственный университет, 2010.
2. Bingen Yang., Stress, Strain and Structural Dynamics: An Interactive Handbook of Formulas, Solutions, and MATLAB Toolboxes.
3. Jalal Afshar, Harmonic Mechanical Vibrations with Digital Computer Applications.
4. Лавендел Э.Э., Вибрации в технике. Справочник, Т. 4.
5. Фролов К.В., Вибрации в технике. Справочник, Т. 6.

#### **References**

1. Buryaka V.A., Injenernyy analiz v Ansys Workbench. Samarskiy gosudarstvennyy universitet, 2010.
2. Bingen Yang., Stress, Strain and Structural Dynamics: An Interactive Handbook of Formulas, Solutions, and MATLAB Toolboxes.
3. Jalal Afshar, Harmonic Mechanical Vibrations with Digital Computer Applications.
4. Lavendel E.E., Vibracii v tehnikе. Spravochnik, T. 4.
5. Frolov K.V., Vibracii v tehnikе. Spravochnik, T. 6.