

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Россия, г.Пенза, Пензенский государственный университет

Methods and means of modeling are considered. A model of the research object is constructed and its harmonic analysis is performed. The introduction of methods for solving a complex oscillation on the object of research through the points of its fixation is substantiated. The amplitude-frequency characteristics of the oscillation of the object of investigation for various models of oscillations and the constructed forms of oscillations at resonant frequencies are calculated and constructed.

1 Выбор метода моделирования

При проектировании аппаратуры бортовых устройств разработчику печатных плат необходимо знать собственные резонансные частоты плат и форму их колебаний. Знание собственных частот позволит определить при каких внешних воздействиях возможен механический резонанс плат. Форма колебания помогает выбрать опасные и безопасные места на плате для размещения элементов [1].

Практическое применение аналитических методов для решения задач динамики конструкций сопряжено с рядом трудностей. Конструкции современной аппаратуры представляют собой сложные механические системы с множеством упругих и жёстких связей, с неклассическими для строительной механики способами крепления отдельных конструктивных элементов. Для такой механической системы сложно построить расчётную модель, достаточно простую и в то же время хорошо отражающую физические и динамические свойства, тем более, что конструкция содержит множество неконтролируемых параметров, например, усилия затяжки соединений при сборке плат в пакет, коэффициенты механических потерь материалов элементов. При составлении и решении уравнений движения конструкции возникает ряд математических трудностей [2-4].

Эти причины способствовали быстрому развитию численных методов, которые и получили в настоящее время широкое распространение с внедрением в практику инженерных расчётов цифровых ЭВМ. Основу численных методов расчётов динамических параметров конструкции составляют: метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и различные вариационные методы, в том числе и энергетический метод [5].

В МКЭ исходная область определения функции разбивается неравномерной сеткой на отдельные участки – конечные элементы [6].

Алгоритм МКЭ включает четыре этапа

1. Разбиение заданной области, например, площади ячейки, на конечные элементы
2. Выбор аппроксимирующей функции в виде полинома для каждого элемента.
3. Объединение полученных полиномиальных функций в систему алгебраических уравнений.
4. Решение полученной системы уравнений и определение вектора узловых значений функции (перемещений, ускорений).

Системы конечно-элементного анализа (FEA), в зависимости от возможностей подразделяются на системы среднего уровня (NASTRAN, PATRAN, COSMOS и др.) и так называемые «тяжелые» САПР (MARC, ANSYS).

FEA позволяют проводить линейный и нелинейный динамический анализ при гармонических и случайных воздействиях на объект исследований. В расчетах

учитываются основные характеристики материалов, включая различные типы демпфирования: конструкционное демпфирование; внутреннее демпфирование в материалах; вязкоупругое демпфирование дискретных элементов.

ANSYS включает в себя следующие программы анализа поведения механических конструкций:

ANSYS/Multiphysics – самый мощный, многоцелевой продукт компании, представляет собой программное средство анализа для широкого круга инженерных дисциплин, которое позволяет проводить расчетные исследования не только в таких отдельных областях знания, как прочность, распространение тепла, механика жидкостей и газов или электромагнетизм, но и решать связанные задачи. Эта программа обеспечивает оптимизацию проектных разработок на уровне, позволяющем моделировать инженерные проблемы в наиболее полной постановке.

ANSYS/Mechanical предназначен для выполнения проектных разработок, анализа и оптимизации: решения сложных задач прочности конструкций, теплопередачи и акустики. Эта программа, обеспечивающая проверку правильности проектных работ, является мощным инструментом для определения перемещений, напряжений, усилий, температур и давлений, а также других важных параметров.

ANSYS/Structural выполняет сложный прочностной анализ конструкций с учетом разнообразных нелинейностей, среди которых геометрическая и физическая нелинейности, нелинейное поведение конечных элементов и потеря устойчивости. Используется для точного моделирования поведения больших и сложных расчетных моделей.

2 Модель объекта

В качестве объекта моделирования была выбрана прямоугольная плата с соотношением сторон 2:1, размером 100x50 мм, толщиной 0,78 мм. Материал платы PR4, модуль Юнга $E=21000$ МПа; коэффициент Пуассона 0,15; плотность материала 1790 кг/м³; масса платы $6,981 \times 10^{-3}$ кг; объем платы 3900 мм³ (рис. 1).

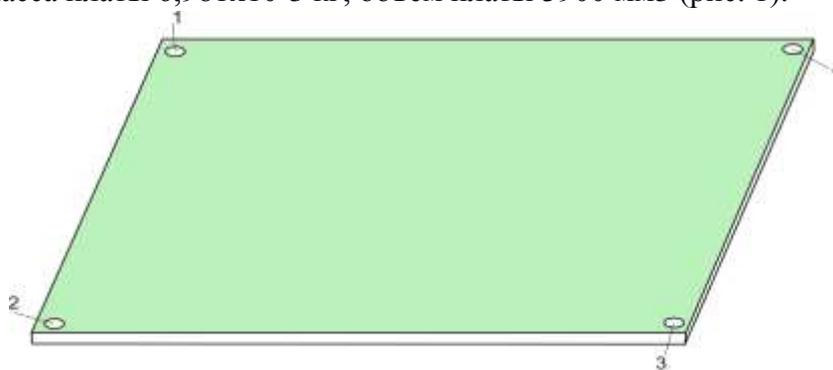


Рисунок 1 – Модель в ANSYS

Все крепежные отверстия пронумерованы (1, 2, 3, 4) и находятся на расстоянии 5 мм от края платы. Диаметр отверстий 2,5 мм. Через отверстия плата (пластина) крепится к соответствующим возбудителям вибрации (4 шт.), имеющим тот же номер.

Плата в рассматриваемой модели выбрана без отверстий и установленных элементов. Рассмотрение задачи с установленными элементами лишь немного усложняет решение, но принципиально на характер проводимого исследования не влияет [7, 8].

Используя программный комплекс ANSYS был выполнен гармонический анализ платы, то есть определены собственные резонансные частоты для выбранного способа закрепления. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 Резонансные частоты колебаний платы по рисунку 1

Собственные частоты		9	2214,5	20	5315,1
№	f, Гц	10	2435	21	5876,2
1	306,92	11	3001,2	22	5947,3
2	553	12	3295,2	23	5974,7
3	835,65	13	3325,1	24	6249,8
4	1263,4	14	3400	25	6786,4
5	1301,1	15	3945	26	6887,4
6	1632,4	16	4291,2	27	6927,8
7	1746,3	17	4491,4	28	7705
8	2201,8	18	4524,6	29	7712,9
		19	5129,7	30	7853

В таблице приведены первые 30 резонансных частот.

3 Задание способа колебаний

Однако при определении и построении формы колебаний платы оказалось, что важным условием является способ задания вынужденного колебания на плату через точки ее закрепления [9, 10].

В случае испытаний по ГОСТ плату крепят на расширительном столе одного мощного вибровозбудителя колебаний, который возбуждает синусоидальные, узкополосные случайные или широкополосные случайные вибрации (ШСВ). ШСВ ввели в испытательный процесс для имитации действий пушечно-стрелкового вооружения (ПСВ). Воздействие на плату при всех возможных комбинациях на столе вибростенда происходит через точки крепления платы синфазно – совпадающим по фазе сигналом.

При исследовании плат на реальных бортовых объектах наблюдали, что на точки крепления платы, находящиеся на различных расстояниях друг от друга, механические воздействия внешних колебаний приходят со сдвигом фаз и даже в противофазе при высоких и при низких частотах [11, 12].

На основании приведенных условий моделирование проводили, используя схему возбуждения на четырех вибраторах, установленных в точках крепления. При этом рассматривали четыре способа возбуждения колебаний таблица 2.

Таблица 2 – Задаваемые способы возбуждения колебаний

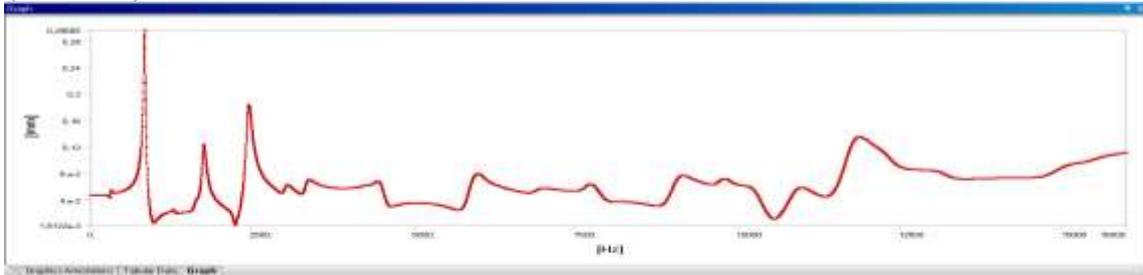
1 способ –	все точки закрепления изначально движутся синфазно: точки крепления 1, 2, 3, 4 - $S = 1 \times \sin(\omega t)$
2 способ –	противофазное возбуждение вибраций: (вдоль длинной стороны): точки крепления 1, 2 - $S = 1 \times \sin(\omega t)$; точки крепления 3, 4 - $S = 1 \times \sin(\omega t + \pi)$
3 способ –	противофазное возбуждение вибраций: (вдоль диагонали): точки крепления 1, 3 - $S = 1 \times \sin(\omega t)$; точки крепления 2, 4 - $S = 1 \times \sin(\omega t + \pi)$
4 способ –	противофазное возбуждение вибраций: (вдоль короткой стороны): точки крепления 1, 4 - $S = 1 \times \sin(\omega t)$; точки крепления 2, 3 - $S = 1 \times \sin(\omega t + \pi)$

С помощью пакета программ ANSYS рассчитаны и построены амплитудно-частотные характеристики колебания плат четырех рассмотренных способов возбуждения колебаний (рис. 1). Вдоль оси абсцисс – частота, вдоль оси ординат – среднеквадратичное значение амплитуды колебаний точек платы.

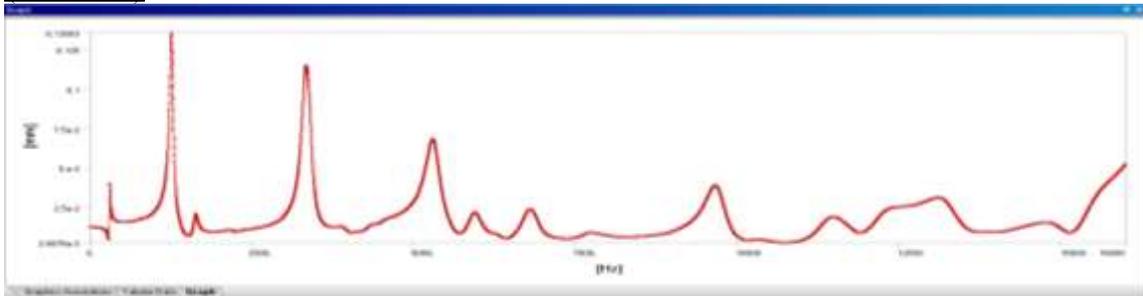
(1 способ)



(2 способ)



(3 способ)



(4 способ)

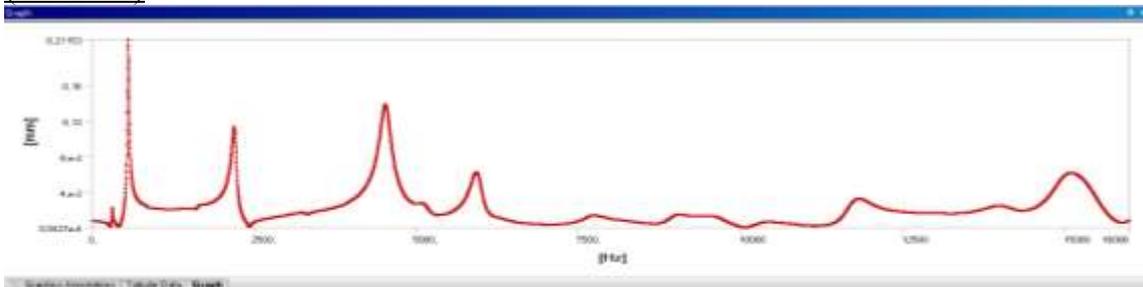


Рисунок 1 - Амплитудно-частотные характеристики колебаний плат при разных способах возбуждения колебаний

Из анализа полученных графиков следует:

1. Ни при одном способе возбуждения колебаний резонанс плат не возникает на всех собственных частотах платы.

2. При каждом способе возбуждения резонанс наблюдается только на следующих частотах (значения из табл.1):

При первом способе возбуждения колебаний (все точки в фазе) :

Резонанс наблюдается на: 1, 4, 6, 8, 12 ... собственных частотах

При втором способе возбуждения колебаний (в противофазе вдоль длиной стороны):

Резонанс наблюдается на: 1, 3, 7, 10 ... собственных частотах

При третьем способе возбуждения колебаний (в противофазе вдоль диагонали):

Резонанс наблюдается на: 1, 4, 6, 13, 14, 20 ... собственных частотах

При четвертом способе возбуждения колебаний (в противофазе вдоль короткой стороны):

Резонанс наблюдается на: 1, 2, 8, 18, 22, 55, 56 ... собственных частотах

4. Наибольшее значение среднеквадратической амплитуды колебаний всех точек платы наблюдается только при первом (синфазном) способе возбуждения колебаний. Разница огромна – почти в 30 раз.

Отсюда может следовать вывод, что вполне достаточно проводить испытания плат радиоаппаратуры только при первом – синфазном способе возбуждения колебаний и только на первой резонансной частоте.

Однако это не так.

Далее были построены формы колебания платы на всех резонансных частотах.

Во всех способах возбуждения присутствует первая резонансная частота, форма ее и максимальные (а не среднеквадратичные) значения отличаются друг от друга.

Максимальная амплитуда колебаний (31,086 ед.) на первой собственной частоте наблюдается при синфазном возбуждении колебаний в точках крепления (2 ед.)

Амплитуда измеряется в относительных единицах измерения ANSYS.

Однако, рассмотрим другие формы колебаний, особенно при противофазном способе возбуждения, которые не возбуждаются при стандартном ГОСТ-овском – первом способе исследования.

Третья собственная частота – второй способ возбуждения

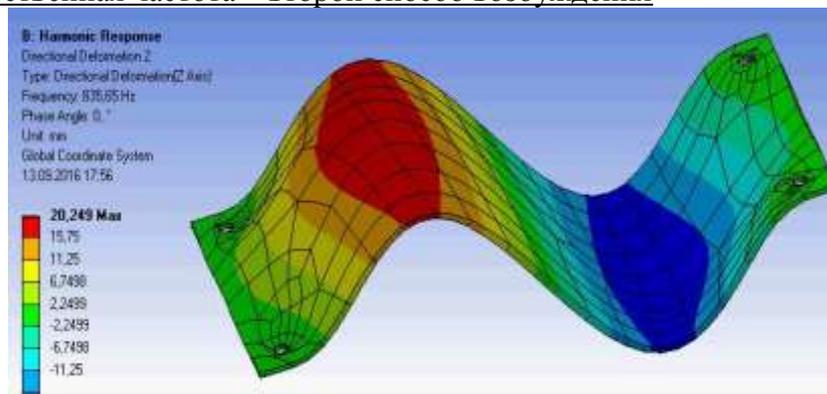


Рисунок 2 – Форма колебаний платы на третьей резонансной частоте (835,65 Гц из табл. 1) при противофазном (вдоль длинной стороны) способе возбуждения колебаний (2 способ), Амплитуда 20, частота 835,65 Гц

Вторая собственная частота – четвертый способ возбуждения

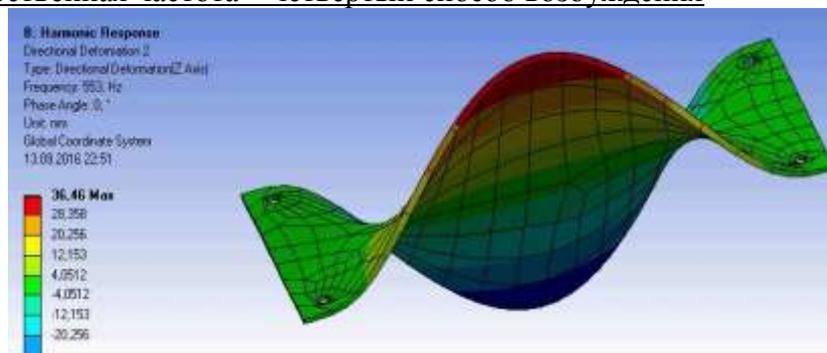


Рисунок 3 – Форма колебаний платы на второй резонансной частоте (553 Гц из табл. 1) при противофазном (вдоль короткой стороны) способе возбуждения колебаний (4 способ), Амплитуда 36, частота 553 Гц

Двадцатая собственная частота – третий способ возбуждения

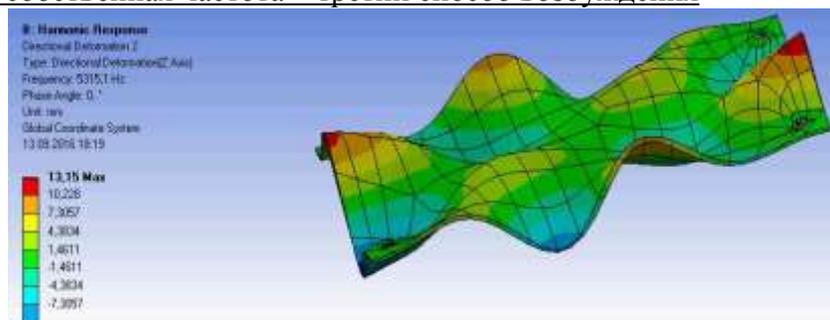


Рисунок 4 – Форма колебаний платы на двадцатой резонансной частоте (5315,1 Гц из табл. 1) при противофазном (вдоль диагонали) способе возбуждения колебаний (3 способ), Амплитуда 13,15, частота 5315,1 Гц

Амплитуда и частота вынужденных колебаний платы при противофазном возбуждении колебаний в различных точках крепления существенно отличается от колебаний платы при синфазном (по ГОСТу) способе испытания: возникают колебания с формами, отличающимися большей кривизной (изогнутостью), на других высоких частотах со сравнимыми амплитудами.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

1. Основы теории надежности электронных средств / Н.К. Юрков, А.В. Затылкин, С.Н. Полесский, И.А. Иванов, А.В. Лысенко // Пенза, 2013.

2. Лапшин Э.В. Методы аппроксимации функций многих переменных применительно к авиационным тренажерам / Э.В. Лапшин, А.К. Гришко, И.М. Рыбаков // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1 (21). С. 3-9.

3. Доросинский А.Ю. Способы улучшения механических характеристик резистивных элементов и методы их расчета / А.Ю. Доросинский, Е.А. Данилова, О.Н. Герасимов, и др. // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1 (21). С. 84-92.

4. Лысенко, А.В. Анализ современных систем управления проектами / А.В. Лысенко // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 371-372.

5. Лысенко, А.В. Анализ особенностей применения современных активных систем виброзащиты для нестационарных РЭС / А.В. Лысенко, Г.В. Таньков, Д.А. Рындин // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 2. С. 155-158.

6. Программа инженерного расчёта температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода / Н.В. Горячев, А.В. Лысенко, И.Д. Граб, Н.К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 340.

7. Лысенко, А.В. Конструкция и методика расчета гибридного виброамортизатора с электромагнитной компенсацией / А.В. Лысенко, А.В. Затылкин, Н.А. Ястребова // Вестник Пензенского государственного университета. 2013. № 4. С. 73-78.

8. Клячкин В.Н., Карпунина И.Н. Статистические методы оценки стабильности функционирования технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2 (22). С. 36-42.

9. Влагозащитное покрытие печатных узлов в датчике утечки воды / А.Г. Белов, В.Я. Баннов, В.А. Трусов, И.И. Кочегаров, А.В. Лысенко, Н.К. Юрков // Современные информационные технологии. 2014. № 19. С. 265-272.

10. Алгоритм функционирования стенда исследования теплоотводов и систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Н.В. Горячев, И.Д. Граб, А.В. Лысенко, Н.К. Юрков // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2011. № 1. С. 385-391.

11. Лысенко, А.В. Методика моделирования внешних механических воздействий на бортовую РЭА / А.В. Лысенко, Е.А. Данилова, Г.В. Таньков / Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2013. Т. 1. С. 226-228.

12. Гришко, А.К. Прогнозирование и оптимизация управления процессов проектирования сложных технических систем в масштабе реального времени / А.К. Гришко, А.В. Лысенко, С.А. Моисеев // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1 (21). С. 40-45.