

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

«Высшая школа электроники и компьютерных наук»

Кафедра «Конструирование и производство радиоаппаратуры»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

\_\_\_\_\_ С.В. Фокина  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ Н.И. Войтович  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Разработка методики моделирования механических воздействий на  
РЭА в среде Autodesk Nastran In-CAD

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель проекта

\_\_\_\_\_ Ю.В. Лысенко  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Автор работы  
студент группы КЭ-224

\_\_\_\_\_ В.А. Полунин  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_ Ю.В. Лысенко  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Челябинск 2018

## АННОТАЦИЯ

Полунин В.А. Разработка методики моделирования механических воздействий на РЭА в среде Autodesk Nastran In-CAD. – Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭЖН, 2018, 66с., 70 ил., библиог. список – 30 наим., 3 прил., 11 плакатов ф.А1.

В ходе проведенного исследования были изучены модели механических воздействий на печатный узел и блок. Выбраны модели в качестве прототипов. На базе прототипных механических моделей предложены новые, усовершенствованные механические модели печатного узла и блока. Разработаны методики расчета механических процессов и воздействий. Произведен расчет трех испытаний на печатный узел и трех испытаний на блок.

					<b>11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ</b>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Разработка методики моделирования механических воздействий РЭА в среде Autodesk Nastran In-CAD</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>	<i>Полунин.</i>						4	66
<i>Пров.</i>	<i>Лысенко</i>					<i>ЮУрГУ Кафедра КуПР</i>		
<i>Рецензен</i>	<i>Фокина</i>							
<i>Н. контр.</i>	<i>Лысенко</i>							
<i>Утв.</i>	<i>Войтович</i>							

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	7
2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	9
3 ВЫБОР САЕ .....	13
4 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ.....	19
4.1 Модели объектов исследования .....	19
4.3 Моделирование механических воздействий на печатные узлы. ....	20
4.3.1 Воздействие вибрации.....	21
4.3.1.1 Расчет резонансов печатного узла.....	21
4.3.1.1.1 Математическая модель расчета резонансов печатного узла.....	21
4.3.1.1.2 Расчет собственных частот печатного узла.....	25
4.3.1.1.3 Анализ результатов моделирования.....	34
4.3.1.2 Расчет печатного узла на воздействие вибрации.....	35
4.3.1.2.1 Математическая модель расчета воздействия вибрации на печатный узел	36
4.3.1.2.3 Анализ результатов моделирования.....	42
4.3.2 Расчет на воздействие механических ударов .....	42
4.3.2.1 Математическая модель расчета воздействия механических ударов на печатный узел....	42
4.3.2.2 Моделирование воздействия ударов на печатный узел.....	44
4.3.2.3 Анализ результатов.....	49
4.4 Моделирование механических воздействий на радиоэлектронные блоки.....	49
4.4.1 Воздействие вибрации.....	49
4.4.1.1 Расчет резонансов блока.....	50
4.4.1.1.1 Математическая модель расчета резонансов блока .....	51
4.4.1.1.2 Расчет собственных частот блока.....	52
4.4.1.1.3 Анализ результатов моделирования.....	54
4.4.1.2 Расчет блока на воздействие вибрации.....	54
4.4.1.2.1 Математическая модель воздействия вибрации на блок .....	54
4.4.1.2.2 Моделирование воздействия вибрации на блок.....	55
4.4.1.2.3 Анализ результатов моделирования.....	58
4.4.2 Расчет блока на воздействие механических ударов .....	58
4.4.2.1 Математическая модель расчета воздействия механических ударов на блок .....	58
4.4.2.2 Моделирование воздействия механических ударов на блок.....	59
4.4.2.3 Анализ результатов моделирования.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	63
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ А. 3D-модели печатного узла и блока.....	67

11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ

Лист

5

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Методы испытаний физических параметров печатных плат, печатных узлов и  
блоков РЭА ..... 69  
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Обзор САЕ-систем инженерного анализа..... 76

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире системы инженерного анализа получили широкое распространение и стали неотъемлемой частью проектной деятельности. В ходе проектирования изделия возникает необходимость проверок и корректировок конструкторской документации. Выпускаемое изделие должно соответствовать определенным эксплуатационным характеристикам и нередко требуется подтверждение работоспособности. Зачастую предприятия проводят испытания на этапе опытного образца. Натурные испытания прототипов являются длительными и затратными, в то время как наиболее эффективным методом испытаний считается проведение виртуальных испытаний с применением современных систем инженерного анализа, CAE (Computer-Aided Engineering), позволяющих численными методами решать различные задачи механики: механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидро-, газодинамики и других дисциплин.

Имитационное моделирование позволяет существенно сократить количество экспериментов, подобрав оптимальные параметры конструкции, тем самым сократив издержки на апробацию результатов или сертификацию изделия. Зачастую результаты виртуальных испытаний дают более широкую картину происходящих процессов, чем натурный эксперимент, предоставляя больше возможностей для оптимизации и улучшения эксплуатационных характеристик, экономя при этом значительные средства и время.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно техническому заданию необходимо разработать методику моделирования механических воздействий на печатную плату, печатный узел и радиоэлектронный блок в САЕ - системах.

В процессе работы возникают задачи проанализировать модели расчета радиоаппаратуры в различных САЕ - системах, глубоко изучить требования современных стандартов применительно к печатной плате, печатному узлу и блоку, выявить программно-реализуемые методы испытаний и смоделировать их.

					11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ	Лист
						8

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Обзор литературы следует условно разделить на две части: изучение нормативной документации по проведению механических испытаний и исследование методик моделирования испытаний.

В литературе [1-10] перечислены основные требования, необходимые для проведения механических испытаний.

Каждой категории аппаратуры соответствуют свои методики испытаний. В литературе [6] представлены основные понятия и классификация РЭС по конструктивной сложности. Согласно техническому заданию выбираем необходимые уровни аппаратуры.

В литературе [1] указана классификация печатных плат и связанные с ней основные понятия. В работе будут рассматриваться печатные платы на жестком основании.

Для корректного моделирования механических воздействий необходимо определиться с техническими требованиями, предъявляемыми к жестким печатным платам.

В литературе [4] указано, что печатные платы, в зависимости от требований заказчика и вида радиоэлектронной аппаратуры, для которой они предназначены, классифицируются по классам.

Применение конкретного метода испытаний при контроле готовых печатных плат определяется требованиями документации на поставку.

Обратимся к стандарту [5] и выделим виды механических испытаний на печатную плату. Классификация приведена на рисунке 2.1.

Представленные методы испытаний физических параметров печатных плат не целесообразно моделировать на этапе конструирования, так как все полученные параметры будут напрямую зависеть от технологии и ошибок при изготовлении [ПРИЛОЖЕНИЕ Б].

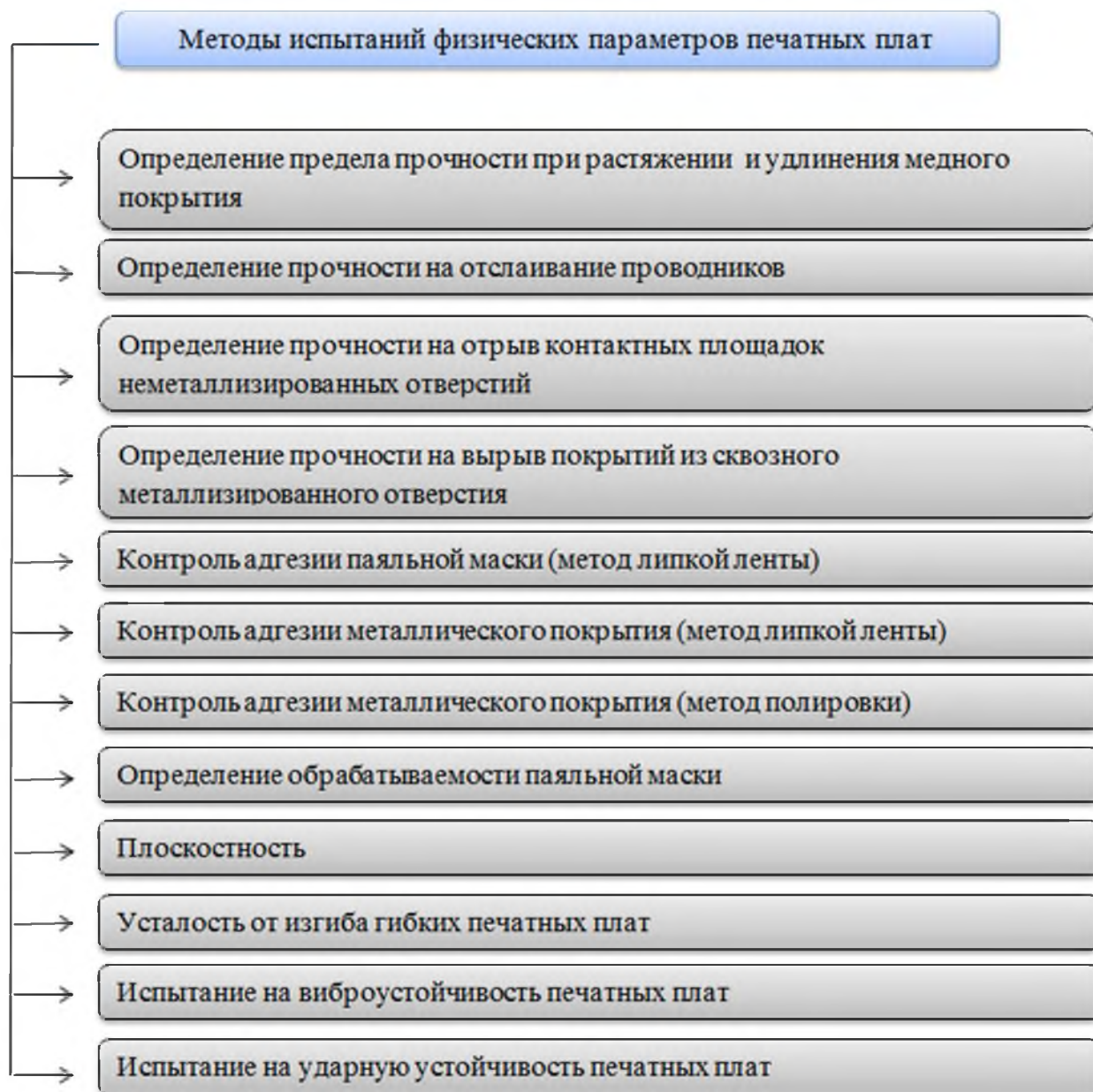


Рисунок 2.1 – Методы испытаний физических параметров печатных плат

Рассмотрим основные требования и существующие методы испытаний, предъявляемые к печатным узлам и радиоэлектронным блокам.

В литературе [7-9] к печатным узлам не предъявляются какие-то определенные требования к ударной и вибрационной прочности.

В литературе [10] устанавливаются методы испытаний печатных плат и печатных узлов, но в стандарте не оговорены виды механических испытаний применительно к печатным узлам. Стандарт состоит из отдельных частей, каждая из которых посвящена определенной теме.



В литературе [27] сказано, что проверку устойчивости печатных плат и гибких печатных кабелей к механическим воздействиям проводят в составе РЭС по требованиям и методике на РЭС. Исходя из этого, следует выделить классификацию РЭС.

В нормативном документе [14] представлена классификация РЭА по объектам установки. В работе будет рассматриваться аппаратура, транспортируемая на автомобильном и дорожном транспорте.

В ходе поиска источников, в которой оговаривались бы методы испытаний печатных узлов и блоков в зависимости от объекта установки, была выбрана литература [11, 28-30]. В этих нормативных документах представлены различные методы испытаний РЭА, относящиеся к разным категориям аппаратуры по условиям эксплуатации.

Обратимся к стандарту [30] и выделим виды механических испытаний для печатного узла и блока. Классификация представлена на рисунке 2.2.

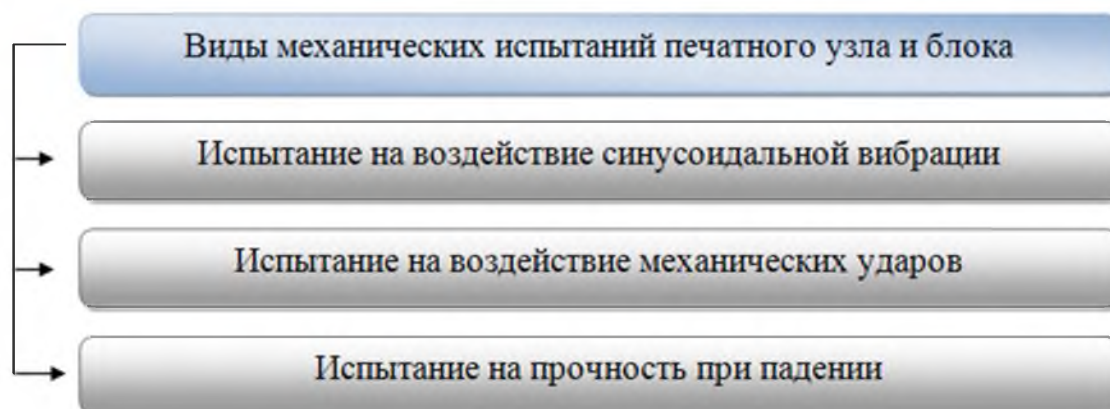


Рисунок 2.2 – Виды механических испытаний РЭА

Подробно каждый вид испытания будет рассмотрен в [ПРИЛОЖЕНИЕ Б] и непосредственно на этапе моделирования и расчетов.

Рассмотрим методики оценки механических воздействий, которые применяют на этапе конструирования изделий.

Для оценки воздействия внешних факторов на устройства РЭА применяют методы аналитического расчета и компьютерного моделирования [23].

В качестве примера аналитических расчетов будем использовать источники [16, 20, 23, 24]. Для компьютерного моделирования используем источники [12, 15, 18, 19, 22, 25, 26].

В перечисленных выше источниках модели расчета механических воздействий различаются.

В литературе [12] рассмотрены только общие примеры расчета печатных узлов без глубокого изучения особенностей модели. В литературе [15] подробно рассмотрено создание расчетной модели блока на механические и тепловые воздействия. Перед проведением расчетов производят оптимизацию сборочного состава, упрощают его геометрию и идеализируют взаимосвязи элементов. В литературе [18] разрабатывается методика частотного анализа печатных узлов. В работе сравниваются результаты расчета точной конечно-элементной модели изделия, упрощенной модели и ее экспериментального исследования. В литературе [19] модель печатной платы из-за имеющихся на ней печатных проводников представляется как ортотропный материал. Прочностные характеристики стеклотекстолита по разным осям отличаются. В литературе [25,26] рассматривается расчет печатного узла с упрощенными моделями радиоэлементов.

В ходе поиска и анализа литературы была сформирована достаточная нормативная база, а также получены необходимые знания для создания моделей расчета печатного узла и блока на механические воздействия.

### 3 ВЫБОР CAE

Рассмотрим основные разновидности CAE-систем и выделим основные критерии выбора программы.

В настоящее время среди CAE выделяют объектно-ориентированные системы и проблемно-ориентированные системы.

Проблемно-ориентированные системы предназначены для решения универсальных задач, а объектно-ориентированные - для решения более узких задач и профессиональных задач различных предметных областей.

Все CAE-системы условно можно разделить по виду решаемых задач. Среди них электрические расчеты, тепловые расчеты, задачи гидродинамики, задачи газодинамики, задачи надежности, задачи электродинамики, задачи механики и другие.

На рисунке 3.1 приведена классификация CAE-систем по виду решаемых задач.



Рисунок 3.1 – Классификация CAE-систем по виду решаемых задач

К представителям CAE-систем, решающим задачи механики, следует отнести программные продукты ANSYS Mechanical, SolidWorks Simulation, Nastran In-CAD, NX Advanced Simulation, Асоника.

В выборе необходимой CAE-системы будем руководствоваться реализуемыми расчетными моделями и основными возможностями программы, которые возможно применить к расчету печатных узлов и блоков РЭА.

### ANSYS Mechanical

Перечислим основные возможности ANSYS Mechanical в задачах механики.

Возможности в решении контактных задач:

- Расчет уплотнений;
- Расчет формообразования и формоизменения;
- Расчет зубчатых соединений и муфт;
- Моделирование болтовых соединений;
- Моделирование трения.

В программе присутствует широкий набор линейных и нелинейных моделей материалов:

- Композиты;
- Учет пластичности материалов;
- Учет гиперупругости резиновых компонентов;
- Модели клеевых слоев;
- Ползучесть и радиационное распухание.

Возможности статического анализа:

- Модели экспресс оценки НДС элементов конструкции;
- Модели расчета деталей под нагрузкой с учетом нелинейного отклика материалов;

- Модели расчета на прочность и устойчивость с учетом нелинейного поведения материалов.

Возможности динамического анализа:

- Модели расчета гармонического анализа;
- Модели расчета спектрального отклика;
- Модели расчета случайных вибраций;
- Модели динамических расчетов во временной области.

11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ

Система инженерного анализа ANSYS Mechanical предлагает большой выбор расчетных моделей, что в свою очередь позволяет учитывать необходимые нюансы при расчетах и получать более точные результаты. ANSYS – универсальный пакет конечно-элементного анализа. В настоящее время он является самым популярным пакетом в сфере автоматизированных инженерных расчетов. К преимуществам также следует отнести большое количество учебных пособий и видео-уроков. В течение многих лет лидерами на рынке CAE-систем остается компания ANSYS.

### SolidWorks Simulation

Перечислим основные возможности SolidWorks Simulation в задачах механики.

Возможности статического анализа:

- Модели расчета перемещений, сил реакции, нагрузок, напряжений и распределения запаса прочности (программа предлагает модель с четырьмя критериями разрушения).

Возможности линейного динамического анализа:

- Модели расчета усталостной прочности;
- Модели расчета колебаний конструкций;
- Модели расчета ударных воздействий.

Другие используемые модели:

- Стационарные и нестационарные модели расчета мачты на ветровые нагрузки по СНиП;
- Модели расчета на прочность с учетом ветровой нагрузки;
- Модели расчета сборок со сложными контактными условиями;
- Модели расчета сварных рамных конструкций;
- Модели расчета эффективных нагрузок композитов;
- Твердотельная модель анизотропной конструкции.

Система инженерного анализа SolidWorks Simulation предлагает большой выбор расчетных моделей для задач механики. Среди них следует выделить способность расчета моделей композитов и сборок со сложными контактными условиями. К преимуществам также следует отнести большее количество учебных пособий и видео-уроков. CAE-системы от компании SolidWorks Simulation занимают второе место в рейтинге систем автоматизированных инженерных расчетов и являются одними из самых популярных пакетов.

### Nastran In-CAD

Перечислим основные возможности Nastran In-CAD в задачах механики.

Возможности в линейных задачах:

- Модели расчета усталостной прочности;
- Модели расчета колебаний, вызванных вынуждающей нагрузкой, заданной спектрально;
- Модели анализа конструкции под воздействием вынужденных и случайных вибраций;
- Модели расчета напряжений при переходном состоянии;
- Модели расчета точки потери устойчивости сжатой.

Возможности в нелинейных задачах:

- Модели расчета с учетом больших деформаций;
- Модели расчета с использованием нелинейных моделей материалов;
- Модели расчета поведения гибких и жестких тел;
- Модели расчета потери устойчивости;
- Модели динамического нелинейного анализа.

Другие используемые модели:

- Модель сварного соединения;
- Модель контакта с учетом трения;
- Модель контакта без возможности проскальзывания, но с возможностью отрыва;
- Модель контакта без учета трения и без учета возможности отрыва.

Система инженерного анализа Nastran In-CAD предлагает различные расчетные модели для задач механики. Среди них следует выделить большой выбор контактных моделей, учет сварных соединений, модели композитных материалов и большие возможности в линейных и нелинейных задачах. К недостаткам следует отнести полное отсутствие учебных пособий.

## NX Advanced Simulation

Перечислим основные возможности NX Advanced Simulation в задачах механики.

Основные используемые модели:

- Модели задач упругости;
- Модели контактного взаимодействия;
- Модели расчета модального анализа;
- Модели расчета теплового анализа;
- Решение задач потери устойчивости;
- Решение задач усталостной прочности;
- Решение задач оптимизации;
- Решение задач нелинейной механики.

Преимущества использования NX Advanced Simulation:

Присутствует возможность, оставаясь в одной и той же среде моделирования NX, использовать для решения различные ведущие промышленные решатели, такие как NX Nastran, MSC Nastran, ANSYS, LS-Dyna и ABAQUS.

Система инженерного анализа NX Advanced Simulation предлагает меньше расчетных моделей, в отличие от программных продуктов рассмотренных выше. К преимуществам также следует отнести больше количество учебных пособий и видео уроков, а также возможность использовать различные решатели. CAE-системы от компании NX Advanced Simulation так же занимают лидирующие места в рейтинге систем автоматизированных инженерных расчетов и являются одними из самых популярных пакетов.

## Асоника

Система автоматизированных инженерных расчетов Асоника является предметно ориентированной САЕ-системой и включает в себя большое количество различных модулей, позволяющих решать задачи из области механики. Среди них Асоника-М, Асоника-М-шкаф, Асоника-М-3D, Асоника-ИД, Асоника-В, Асоника-ТМ, Асоника-УСТ.

Среди основных возможностей следует отметить модели расчета гармонических вибраций, случайных вибраций, ударов, линейных ускорений, воздействия акустического шума и другие.

К преимуществам следует отнести встроенные модели различных блоков и шкафов РЭА. По Асонике выпущено большое количество учебных пособий. Программа русскоязычная, ориентирована на расчеты в области радиоэлектронной аппаратуры. Имеет меньшие возможности, в сравнение с перечисленными выше программами.

Вывод:

Среди перечисленных САЕ-систем была выбрана система Nastran In-CAD, так как реализуемые расчетные модели и возможности программы наиболее эффективны применительно к печатным узлам и блокам РЭА. Новая реализация САЕ от Autodesk потенциально сильнее предыдущих версий и аналогов. Более подробный обзор САЕ-систем представлен в [ПРИЛОЖЕНИЕ В].



## 4 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

В расчетной части пояснительной записки будут подробно рассмотрены расчетные модели печатного узла и блока и предложены новые модели, уточняющие результаты расчета. Далее будут смоделированы резонансы рассматриваемой аппаратуры, воздействие на нее вибраций и механических ударов.

### 4.1 Модели объектов исследования

В качестве исходных данных, к техническому заданию прилагается 3D-модель печатного узла и блока [ПРИЛОЖЕНИЕ А]. На рисунке 4.1 представлена 3D-модель печатного узла.

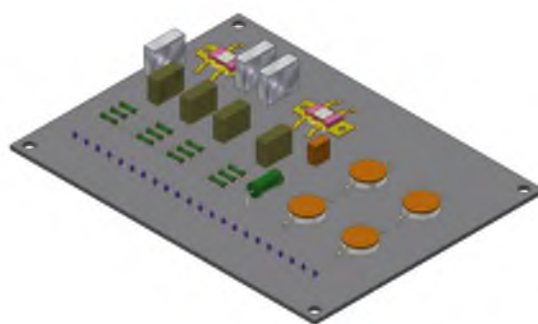


Рисунок 4.1 – 3D-модель печатного узла

На рисунке 4.2 представлена трехмерная модель блока и его взрыв-схема.

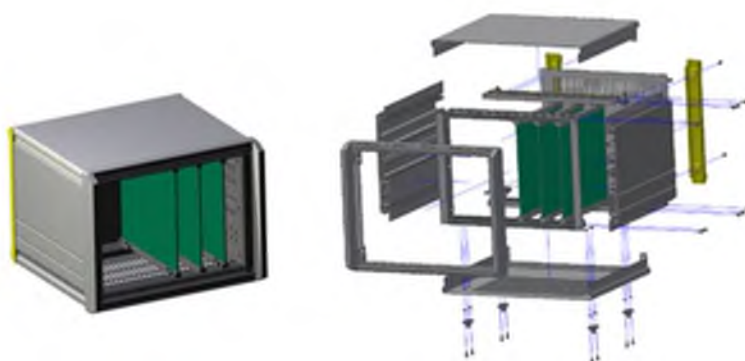


Рисунок 4.2 – 3D-модель блока и его взрыв-схема

В общем случае комплексную модель любого разрабатываемого прибора можно представить как совокупность подмоделей физических процессов и основных связей между ними. Данное представление помогает эффективно решать задачи при проектировании оборудования. На рисунке 4.3 представлена комплексная модель проектирования радиоаппаратуры.

Согласно техническому заданию в работе будет подробно рассмотрена только подмодель механических процессов.

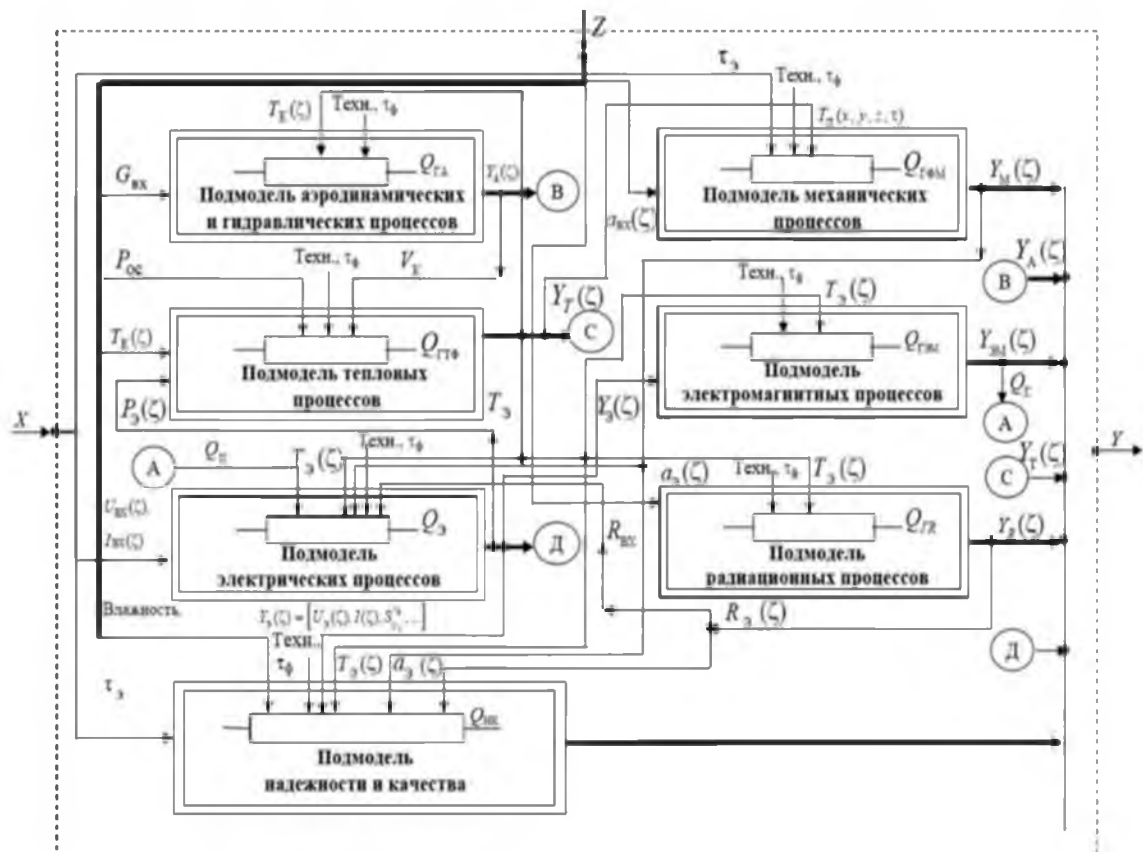


Рисунок 4.3 – Комплексная модель проектирования радиоаппаратуры

#### 4.3 Моделирование механических воздействий на печатные узлы.

На этапе поиска и анализа литературы согласно стандарту [30] были выявлены методы испытаний физических параметров печатных узлов и радиоэлектронных блоков. На этапе расчета печатного узла на механические воздействия сравним различные модели расчета и рассмотрим их влияние на точность результата.

#### 4.3.1 Воздействие вибрации

Согласно стандарту [30] пункт «воздействие вибрации» делят на расчет резонансов печатного узла и непосредственно на воздействие вибрации. В работе будут рассмотрены обе модели расчета.

##### 4.3.1.1 Расчет резонансов печатного узла

Целью моделирования данного испытания является определение возникающих перегрузок печатного узла для оценки их влияния на работоспособность изделия.

##### 4.3.1.1.1 Математическая модель расчета резонансов печатного узла

В качестве исходных параметров для моделирования будут приняты данные, представленные в литературе [25, 26].

Произведем аналитический расчет печатного узла согласно литературе [16] и сравним полученные результаты с расчетом прототипа и новой предложенной моделью.

Рассмотрим исходные данные для расчета резонансов печатного узла, и составим расчетную модель.

Таблица 1 - Физико-механические параметры материала печатной платы

Плотность, [кг/м <sup>3</sup> ]	Модуль Юнга [ГПа]	Коэффициент Пуассона	Коэффициент механических потерь (КМП)	Коэффициент зависимости КМП от напряжения [1/Па]
2135	14	0.22	0.01	$4.3 \cdot 10^{-8}$

В литературе [16] представлены типономиналы используемых ЭРИ. 3D-модель приведена на рисунке 4.4.

#### Рисунок 4.4 – 3D-модель печатного узла

Резонансные частоты данной конструкции будут зависеть от ряда параметров: свойства материала печатной платы, вариантов закрепления узла, точности моделей элементов, их массы, а так же учета массы различных элементов коммутации и паяных соединений.

При построении моделей ЭРИ возникают ошибки в их точности. Это связано с довольно сложной структурой элементов, в которой используются различные виды материалов. В связи с этим возникает задача упрощать модели элементов. Так как на резонанс конструкции большое влияние оказывает масса ЭРИ, то необходимо построить модель, таким образом, чтоб ее масса соответствовала массе реального элемента. Выделим два подхода решения данной проблемы. В САПР масса элемента формируется исходя из его плотности и объема. Таким образом, существует возможность рассчитать плотность материала, зная объем элемента и его исходную массу. Первый вариант подразумевает исполнение реальных объемных моделей и последующий расчет плотности материала для каждого из элементов, а второй – исполнение элементов в виде прямоугольных блоков одной плотности, но разной высоты.

Так как в литературе [25] принят второй вариант упрощения модели, для сравнения расчетов выберем именно его.

На рисунке 4.5 изображена модель материала печатной платы, которая используется в расчете эталона и будет применена для расчета прототипа.

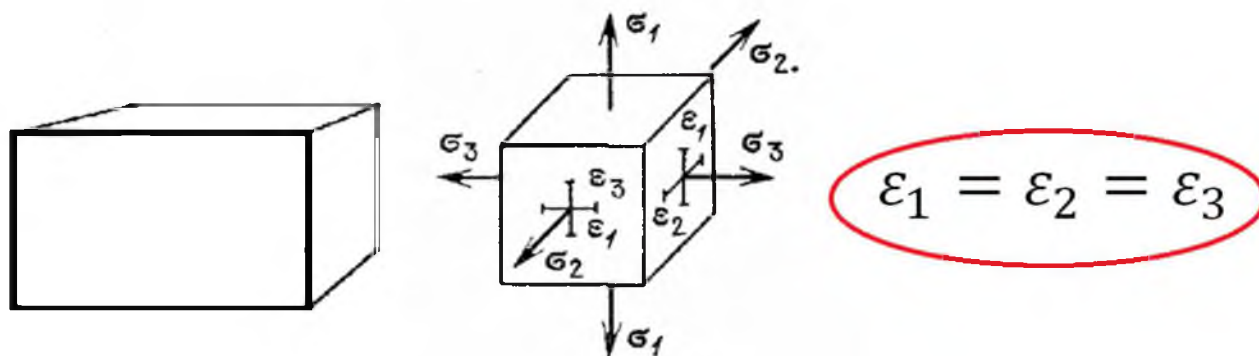


Рисунок 4.5 – Модель материала печатной платы

На рисунке 4.6а представлены физические параметры, необходимые для расчета, а на рисунке 4.6б указана схема закрепления печатного узла.

а)

Материал	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	Плотность	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона	Модуль сдвига
Стеклотекстолит фольгированный	160 (мм)	120 (мм)	2 (мм)	2135 (кг/м <sup>3</sup> )	14 (ГПа)	0,22	3400 (МПа)

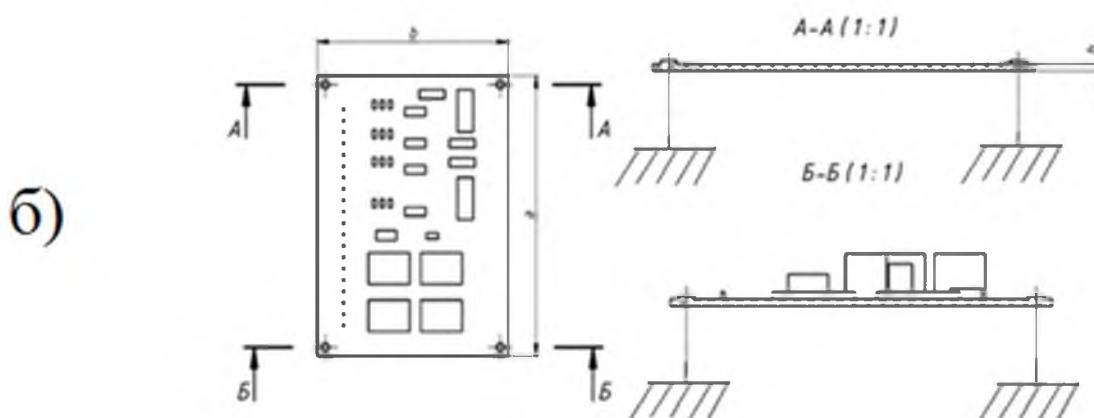


Рисунок 4.6 – Расчетные параметры печатного узла

Модель прототипа учитывает материал печатной платы как изотропный – физические свойства во всех направлениях одинаковы.

На рисунке 4.7 предложена модель, учитывающая слоистое строение стеклотекстолита и наличие проводников. Физические свойства такого материала, в разных направлениях могут отличаться.

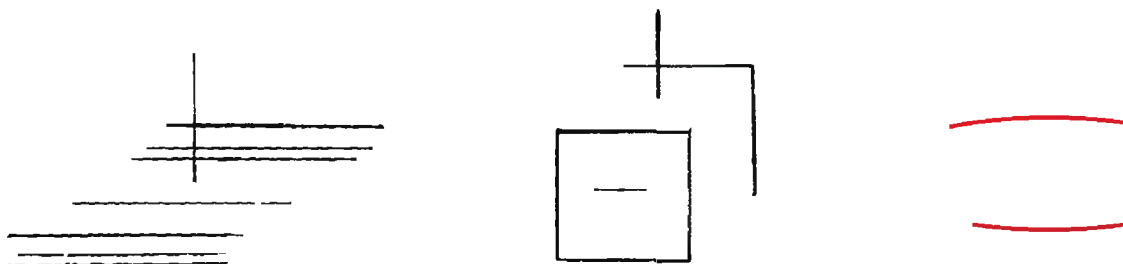


Рисунок 4.7 – Уточненная модель материала печатной платы

Параметры таких физических величин как модуль Юнга и коэффициент Пуассона теперь следует учитывать иначе. На рисунке 4.8 изображены физические свойства стеклотекстолита с учетом внесенных изменений в расчетную модель.



Рисунок 4.8 – Расчетные параметры печатного узла

По литературе [16] определим частоту собственных колебаний равномерно нагруженной пластины.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{K_\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{M}} ab, \quad (1)$$

где  $a$  – длина пластины, м;

$b$  – ширина пластины, м;

$D$  – цилиндрическая жесткость, Нм;

$M$  – масса пластины с электро компонентами, кг;

$K_\alpha$  – коэффициент, зависящий от способа закрепления сторон пластины.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости для материала платы,  $\text{Н/м}^2$ ;

$h$  – толщина платы, м;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

$$M = M_{\text{пп}} + M_{\text{ЭК}}, \quad (3)$$

где  $M_{\text{пп}}$  – масса печатной платы, кг;

$M_{\text{ЭК}}$  – масса электрических компонентов, кг.

$$M_{\text{пп}} = \rho_{\text{пп}} hab, \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{пп}}$  – плотность материала платы,  $\text{кг/м}^3$ .

$$M_{\text{ЭК}} = \sum_{i=1}^N m_i N_i, \quad (5)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го электрического компонента  $i$ -го типа;

$N_i$  – количество электрических компонентов  $i$ -го типа.

#### 4.3.1.1.2 Расчет собственных частот печатного узла

Прежде чем приступить к CAE-анализу, необходимо импортировать модель изделия. Для этого необходимо перейти в раздел «среды» и запустить встроенный модуль Autodesk Nastran In-CAD. Запуск среды Autodesk NASTRAN In-CAD представлен на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Запуск среды Autodesk Nastran In-CAD



Для расчета конструкции резонансные частоты и определение форм колебаний необходимо в дереве построения выбрать тип анализа «Normal Modes». Выбор типа анализа представлен на рисунке 4.10.

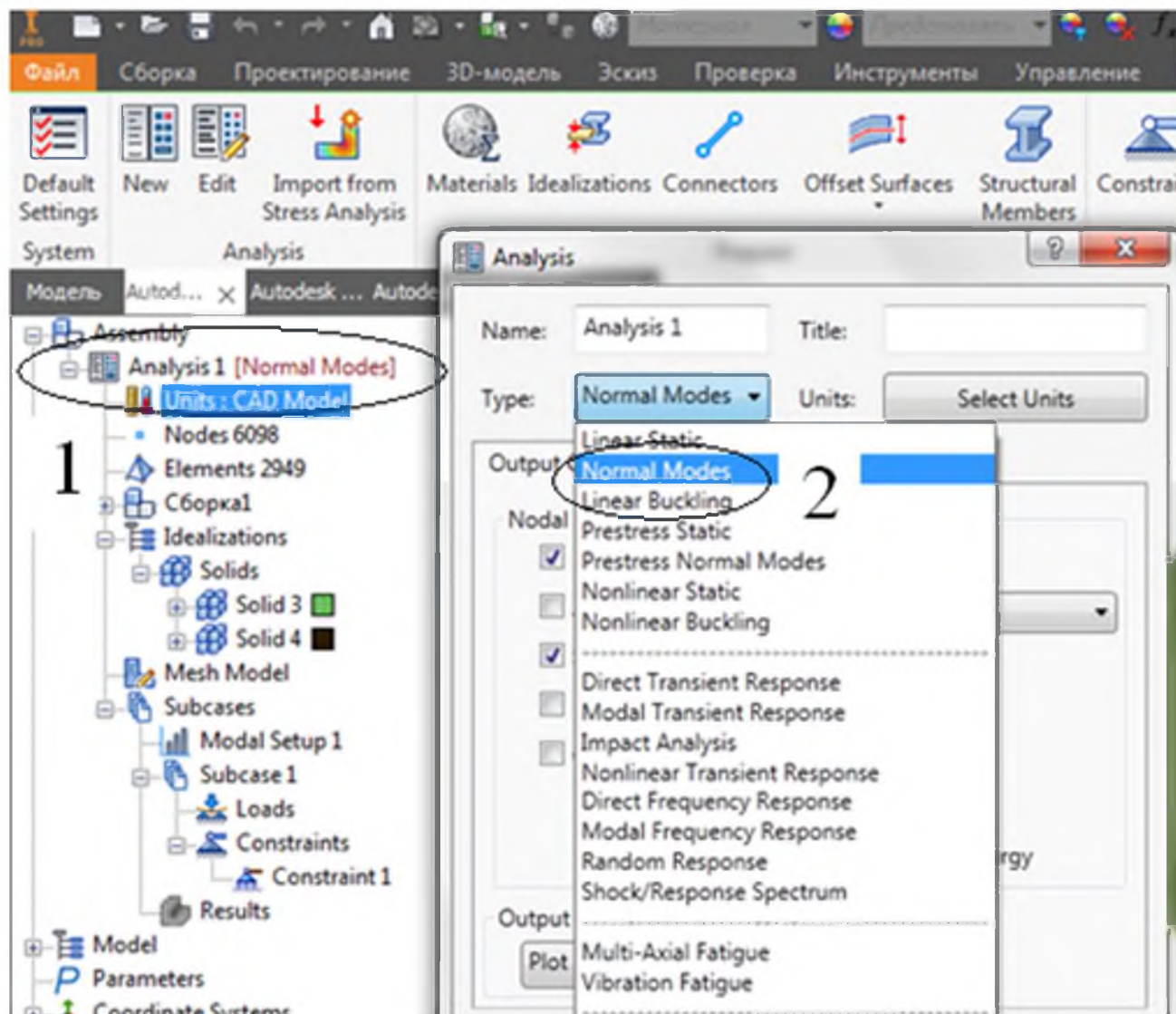


Рисунок 4.10 – Выбор типа анализа

Далее необходимо указать условия расчета и сформировать сетку. Для этого перейдем в раздел «Mesh Settings» в подраздел «New Idealization». Переход в раздел «Mesh Settings» и настройка конечно-элементной сетки указаны на изображении 4.11.





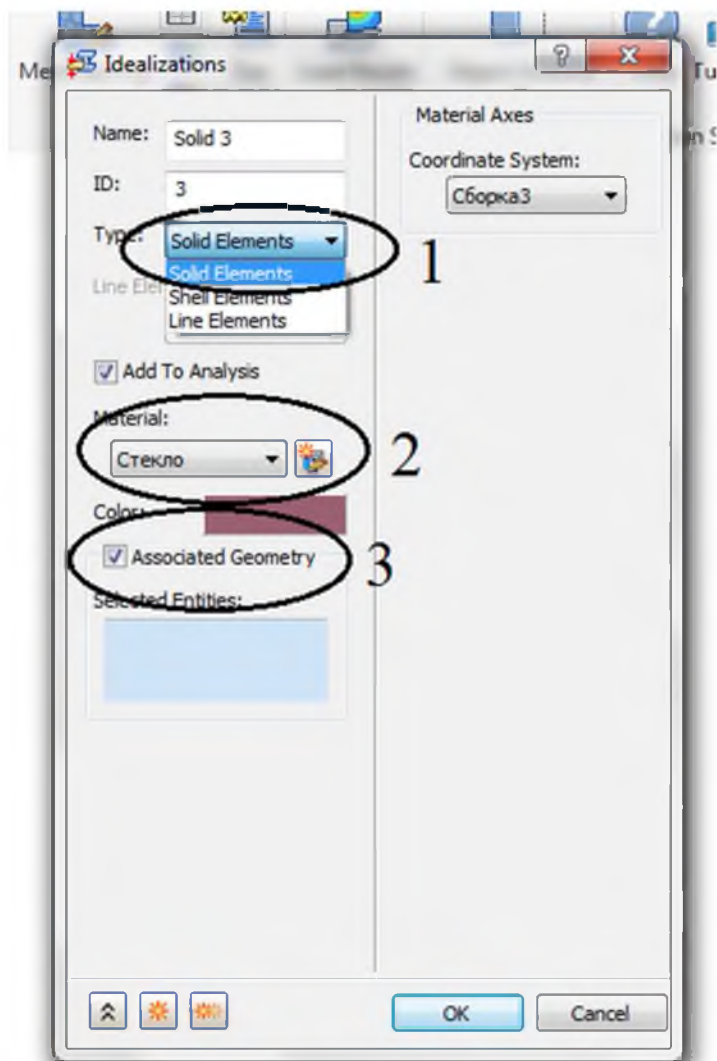


Рисунок 4.12 – Выбор типа элемента и его свойств

Для перехода в настройки материала необходимо нажать на вкладку «Material» (см. рисунок 4.12), после чего откроется окно настроек, представленное на рисунке 4.13.

Во вкладке «Type» необходимо выбрать тип элемента. Так как в литературе [25] для расчета выбран тип «Isotropic», выберем его. Во вкладке «Select Material» выбираются материалы из базы Inventor, а так же можно добавить заранее созданный материал. Сохранить новый материал можно нажатием на вкладку «Save New Material». Во вкладках «General» и «Structural» необходимо указать все физические параметры материала, необходимые для расчета.


11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ

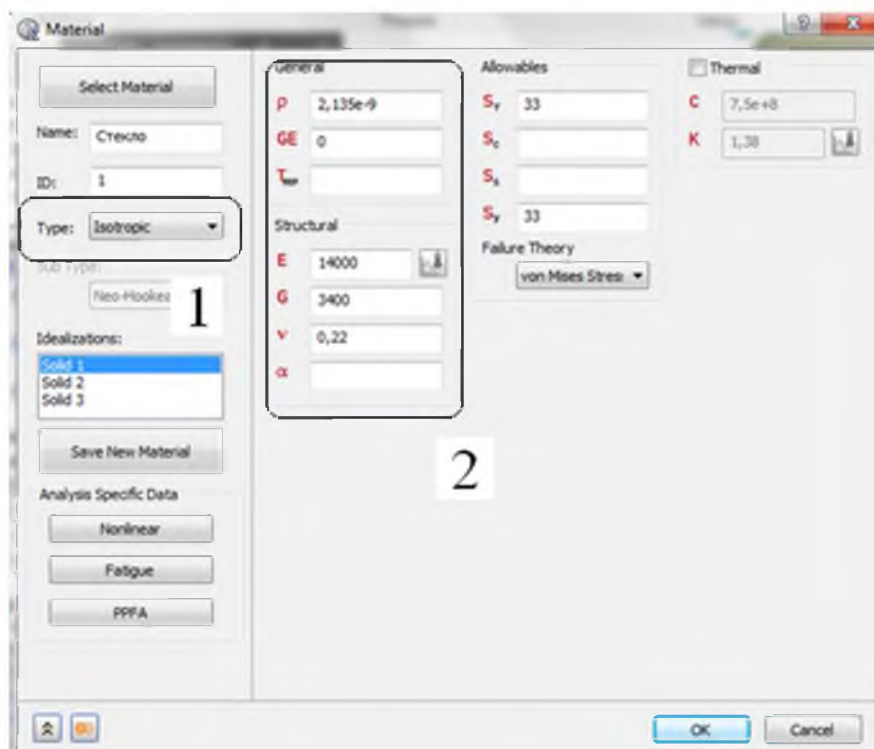


Рисунок 4.13 – Физические параметры стеклотекстолита

Для расчета предложенной уточненной модели необходимо учесть слоистость стеклотекстолита и его физические свойства. На рисунке 4.14 представлен пример учета ортотропных свойств материала стеклотекстолита.

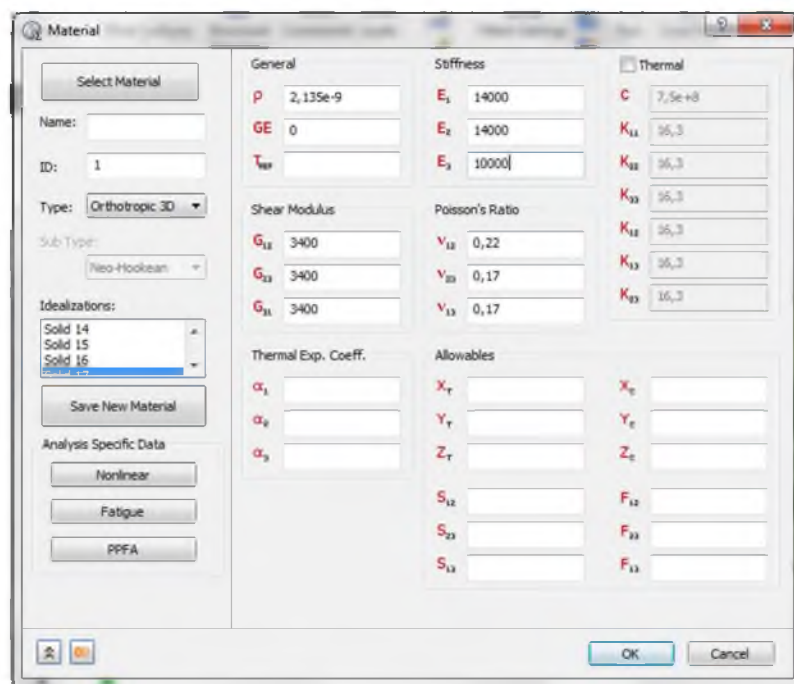


Рисунок 4.14 – Настройка свойств материала







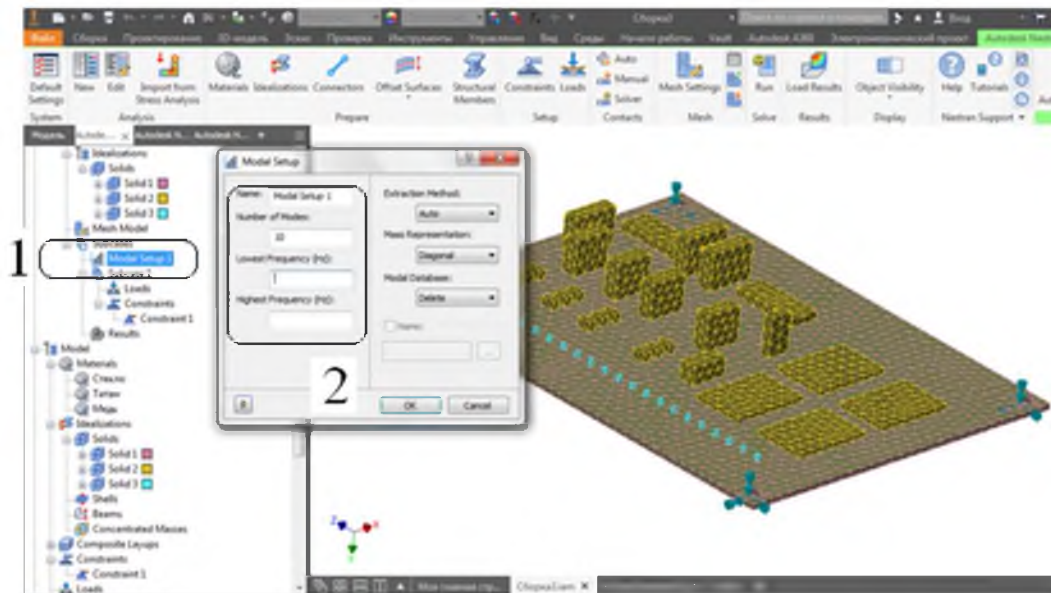


Рисунок 4.18 – Граничные условия

Запускаем моделирование и получаем значения резонансных частот печатного узла и значения его деформации в миллиметрах.

На рисунках 4.19, 4.20 представлена первая резонансная частота, полученная при расчете прототипа.

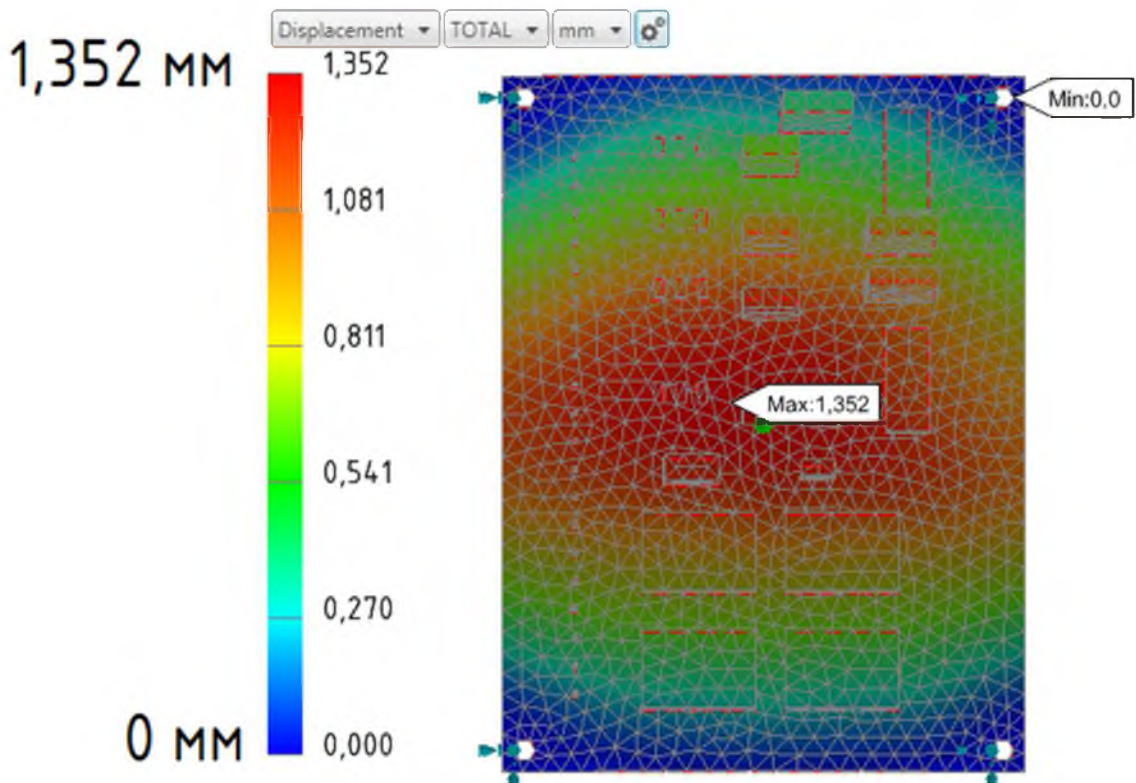


Рисунок 4.19 – Резонанс на частоте 196,8 Гц


11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ



На рисунке 4.20 представлена форма колебаний печатного узла на первой резонансной частоте.

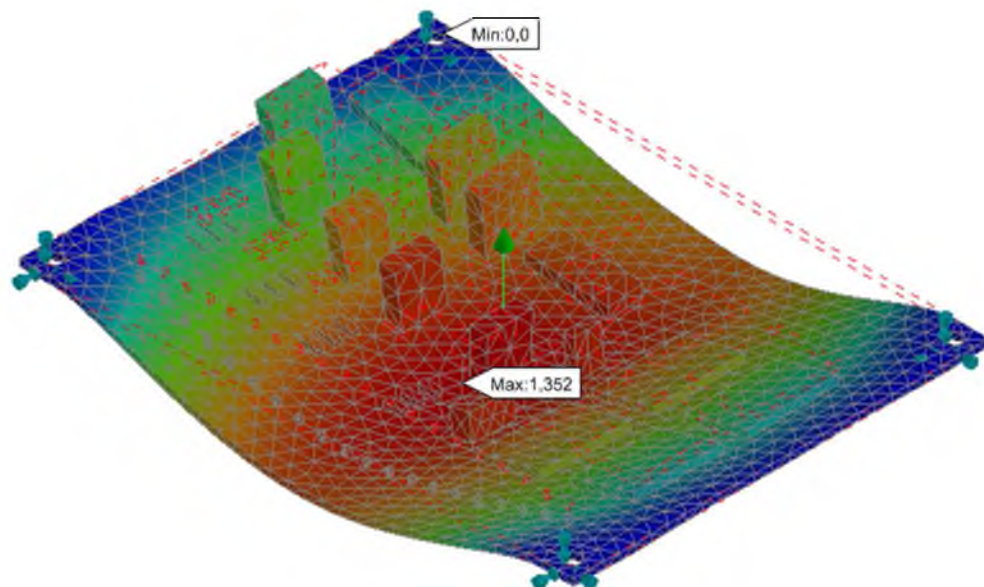


Рисунок 4.20 – Форма колебаний на частоте 196,8 Гц

На рисунках 4.21, 4.22 представлен результат расчета разработанной модели.

На рисунке 4.21 представлен резонанс печатного узла на частоте 167,7 Гц.

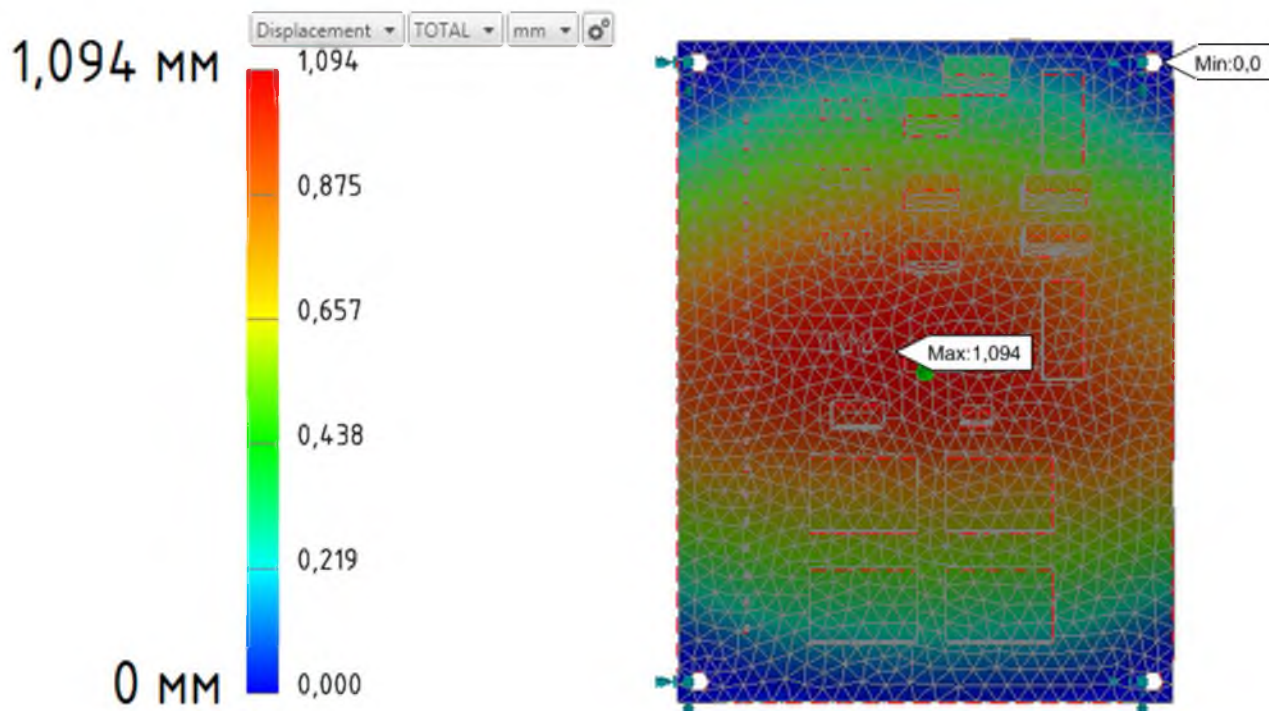


Рисунок 4.21 – Резонанс на частоте 167,7 Гц





На рисунке 4.25 представлен фрагмент аналитического расчета первой резонансной частоты печатного узла.

```

|
| > E:=3.02e10;           Ka:=15.86
| > mek:=-56e-3;        E:=302 1011
| > Mpp:=-p*a*b*h;      mek:=.056
| > M:=Mpp+mek;         Mpp:=.081984000
| > DD:=(E*h^3)/(12*(1-nu^2)); M:=.137984000
| > f0:=(1/6.28)*(Ka/a^2)*sqrt((DD/M)*a*b); DD:=21.15734903
|                               f0:=169.2662795

```

Рисунок 4.25 – Рассчитанная аналитически первая мода

Таблица 2 – Сравнение результатов моделирования

	Эталон	Прототип	Разработанная модель
Первая резонансная частота	169,2 Гц	196,8 Гц	167,7 Гц
Расхождение с эталоном	0%	<b>15,9%</b>	<b>1,18%</b>

Вывод:

Расхождение рассчитанного значения эталона отличается от значений прототипа на 15,9%, что в свою очередь свидетельствует о недостаточно точной цифровой модели прототипа.

Можно отметить довольно значимое сходство результатов расчета эталона и разработанной модели. Новая модель учитывает свойства материала печатной платы и потенциально является точнее.

#### 4.3.1.2 Расчет печатного узла на воздействие вибрации

Целью моделирования данного испытания является определение действующих на печатный узел внешних механических перегрузок, а также возникающих максимальных перемещений при действии вибрации.

#### 4.3.1.2.1 Математическая модель расчета воздействия вибрации на печатный узел

Для расчета воздействия вибрации будем использовать модели, рассмотренные при расчете резонансов печатного узла (см. рисунок 4.5-4.8).

Вибрация будет направлена по нормали к плоскости печатного узла, непосредственно на элементы его крепления. Направление вибрации приведено на рисунке 4.26.

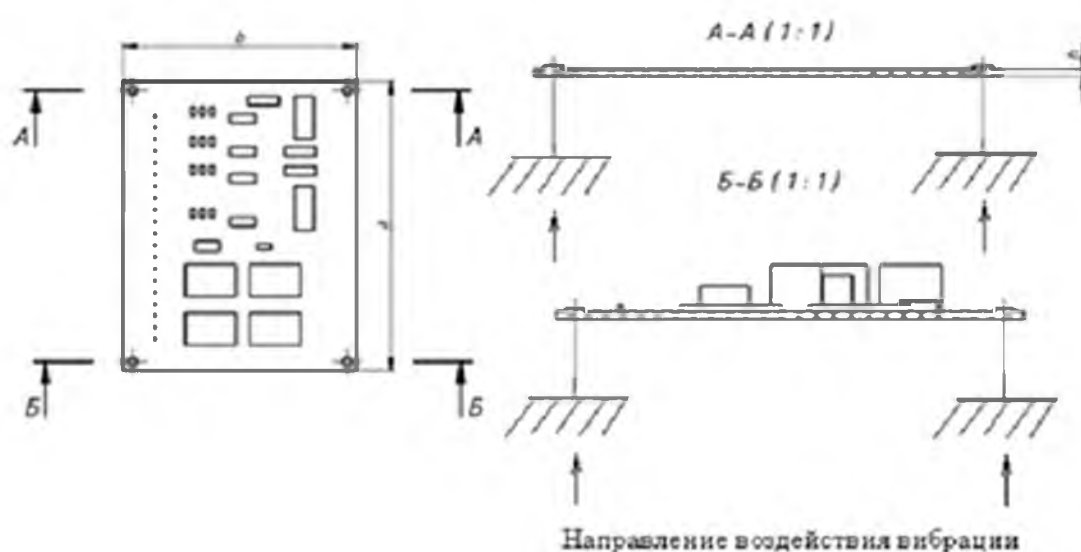


Рисунок 4.26 – Направление воздействия вибрации на печатный узел и основные физические параметры расчета

Физические параметры для расчета предложенной модели приведены на рисунке 4.27а.

Параметры вибрации выбраны для аппаратуры, перевозимой автомобильным транспортом, и будут приняты согласно стандарту [30]: частота вибрации – 50 Гц, ускорение –  $40\text{ м/с}^2$ . Параметры выбраны для аппаратуры, перевозимой автомобильным транспортом.

a)

Материал	a	b	h	Плотность	Модуль Юнга			Коэффициент Пуассона			Модуль сдвига
Стеклотекстолит фольгированный	160 (мм)	120 (мм)	2 (мм)	2135 (кг/м³)	Ось X	Ось Y	Ось Z	XZ	XZ	YZ	1400 (МПа)
					11 ГПа	11 ГПа	10 ГПа	0,22	0,17	0,17	

б)

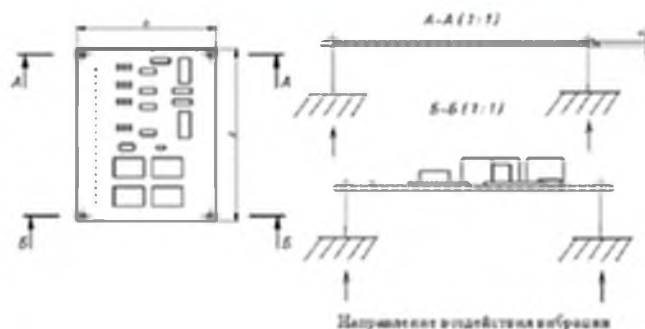


Рисунок 4.27 – Физические параметры предложенной модели расчета

Произведем аналитический расчет печатного узла согласно литературе [16] и сравним полученные результаты с расчетом прототипа и разработанной моделью.

Найдем амплитуду вибросмещения основания для максимальной частоты возбуждения по следующей формуле:

$$\varepsilon_0 = \frac{a_0}{4\pi^2 f_{max}^2}, \quad (6)$$

где  $a_0$  – значение виброускорения,  $\text{м/с}^2$ ;

$f_{max}$  – максимальная частота действующей вибрации, Гц.

Коэффициент передачи по ускорения рассчитывается по следующей формуле:

$$\gamma(x, y) = \frac{\sqrt{(1+(K_1(x)K_1(y)-1)n^2)^2 + \varepsilon^2 n^2}}{\sqrt{(1-n^2)^2 + \varepsilon^2 n^2}}, \quad (7)$$

где  $K_1(x) = 1,29$ ,  $K_1(y) = 1,28$  – коэффициенты формы колебаний;

$\varepsilon = 0,001$  – показатель затухания для стеклотекстолита;

$n = \frac{f_{max}}{f_0}$  – коэффициент расстройки.

Определим виброперемещение:

$$S_B(x, y) = \varepsilon_0 \gamma(x, y). \quad (8)$$

#### 4.3.1.2.2 Моделирование воздействия вибрации на печатный узел

Для расчета воздействия синусоидальной вибрации на печатный узел необходимо сменить тип анализа на «Direct Frequency Response». При необходимости отображения полей ускорений необходимо выбрать пункт «Acceleration». Настройка анализа показана на рисунке 4.28.

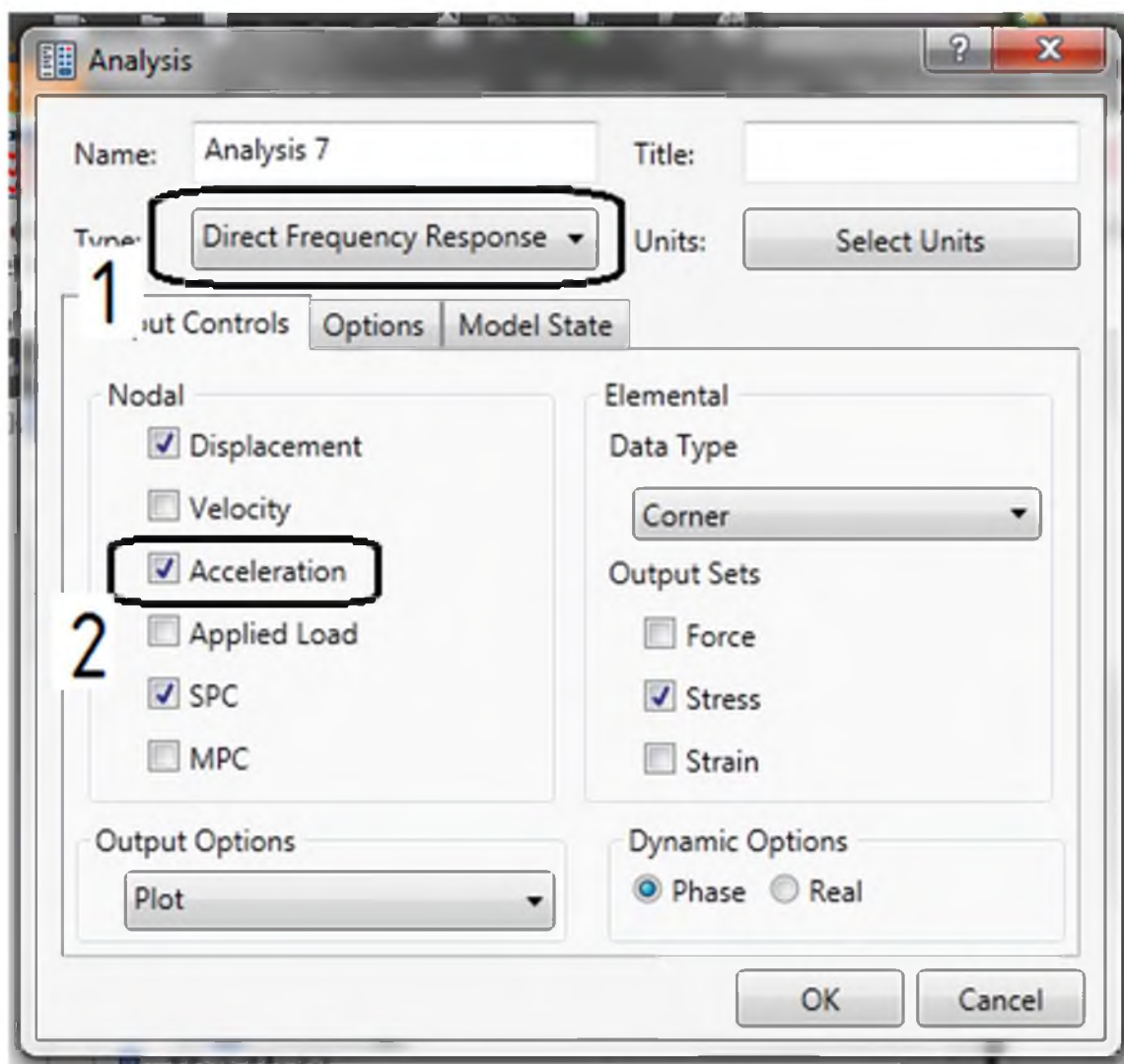


Рисунок 4.28 – Свойства анализа «Direct Frequency Response»

Для настроек параметров анализа необходимо перейти в раздел «Dynamics Setup». Введем исследуемую частоту. Чтобы указать параметр частоты, необходимо во вкладке «Discrete Value» указать необходимые параметры и нажать «Add». На рисунке 4.29 представлена настройка меню «Dynamics Setup».

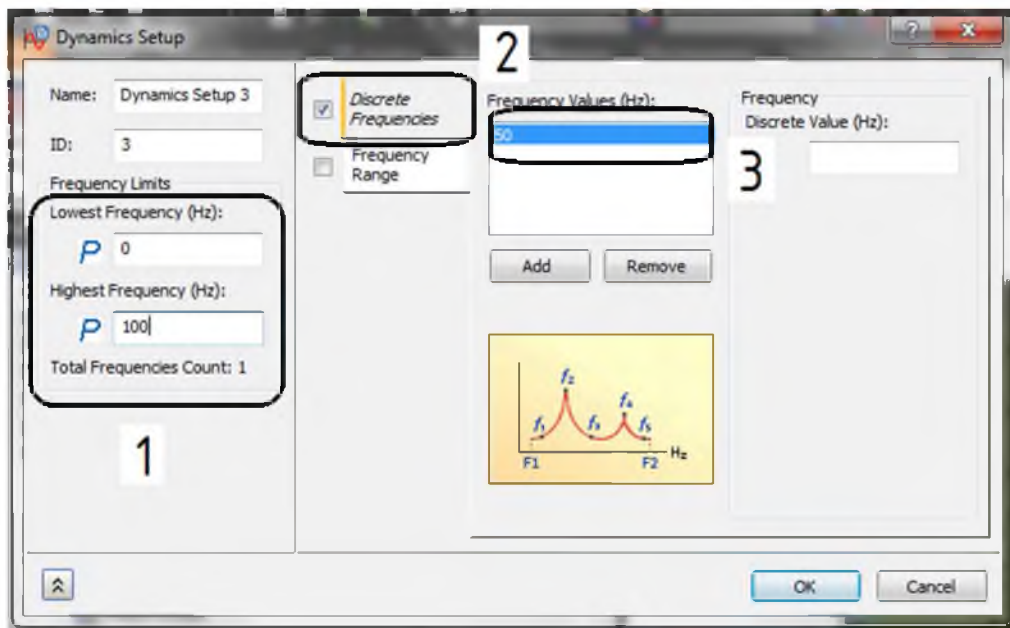


Рисунок 4.29 – Настройка меню «Dynamics Setup»

Далее необходимо перейти в меню «Load», указать плоскости, на которые будет воздействовать вибрация и ее направление, выбрать необходимый тип воздействующего фактора и указать его числовое значение. На рисунке 4.30 представлена настройка основных параметров меню «Load».

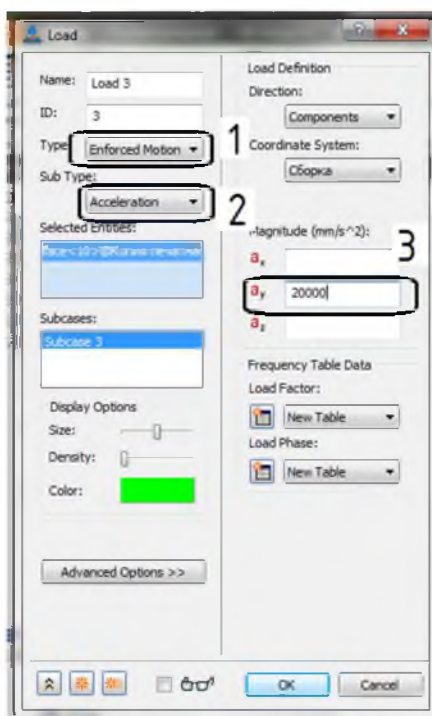


Рисунок 4.30 – Настройка меню «Load»



Настройки конечно-элементной сетки, материалов, закрепления печатного узла оставляем такими же, как были приняты в предыдущем отчете.

На рисунке 4.31 представлен результат воздействия синусоидальной вибрации в виде деформации печатного узла.

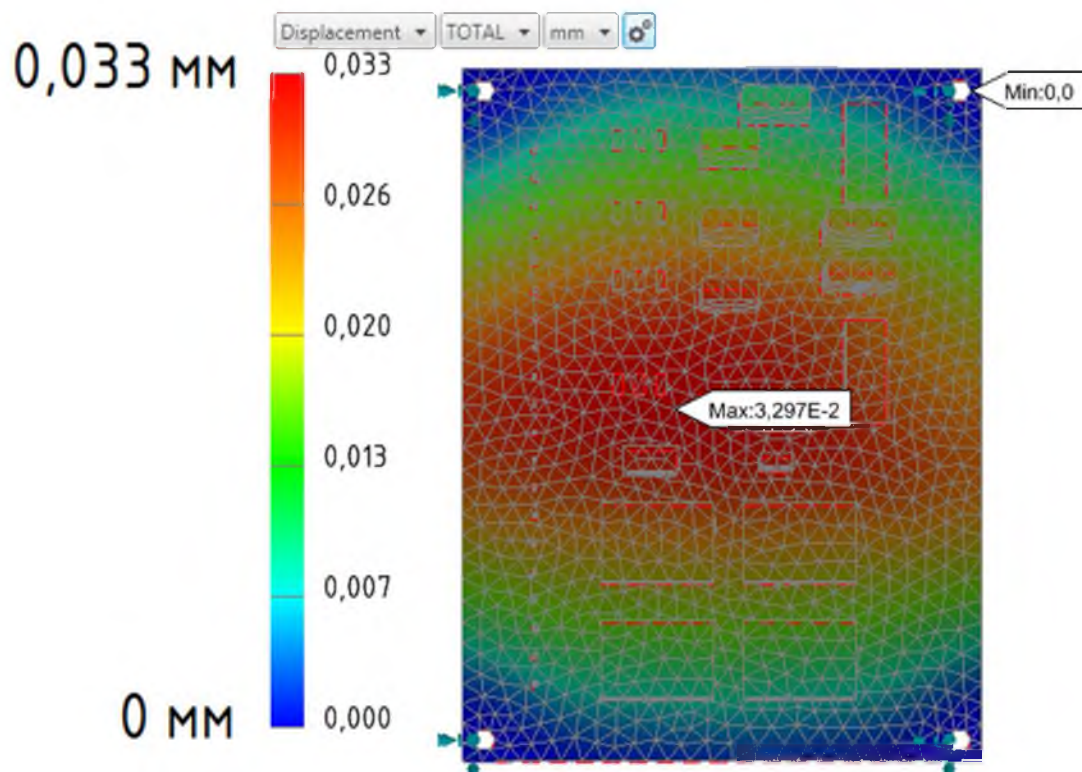


Рисунок 4.31 – Деформация прототипа

На рисунке 4.32 представлена деформация прототипа в изометрии.

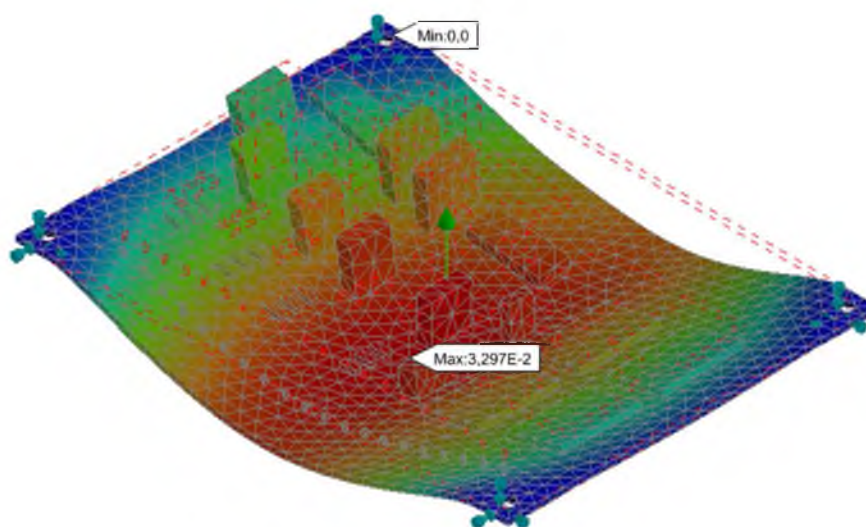


Рисунок 4.32 – Деформация прототипа в изометрии

На рисунке 4.33 представлен результат деформации разработанной модели.

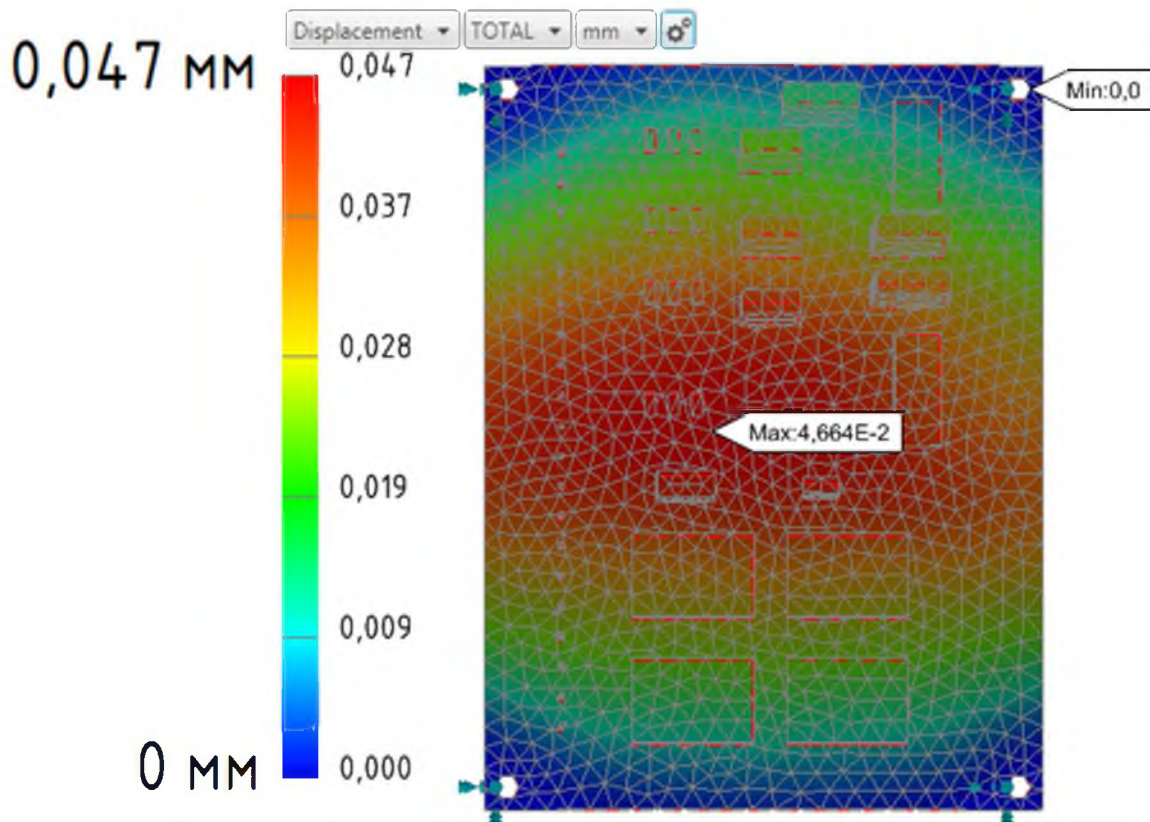


Рисунок 4.33 – Деформация разработанной модели

На рисунке 4.34 представлена деформация разработанной модели в изометрии.

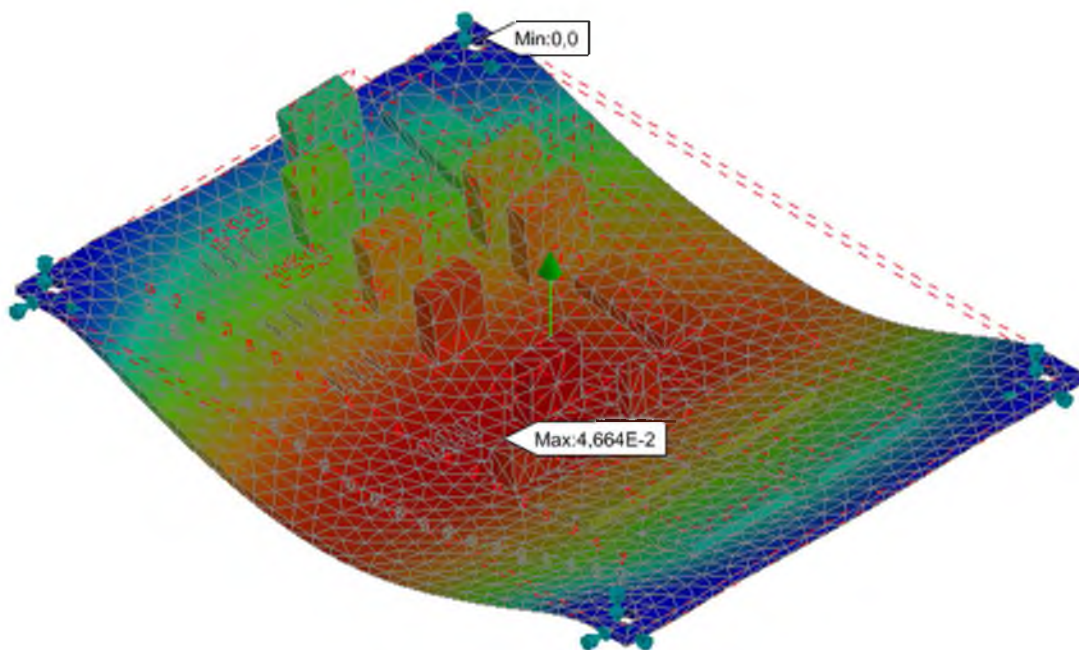


Рисунок 4.34 – Деформация разработанной модели в изометрии


11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ

#### 4.3.1.2.3 Анализ результатов моделирования

Чтобы нагляднее оценить результаты моделирования, создадим таблицу и укажем степень расхождения результатов в процентах.

Таблица 3 – Сравнение результатов моделирования

	Эталон	Прототип	Разработанная модель
Максимальное значение деформации печатного узла	0,041 мм	0,033 мм	0,047 мм
Расхождение с эталоном	0%	<b>19,51%</b>	<b>14,63%</b>

Вывод:

Значения расчета прототипа отличаются от значений эталона на 19,51%. Это связано с недостаточно точной расчетной моделью прототипа, которая не учитывает физические свойства материала подложки. Новая модель учитывает слоистую структуру стеклотекстолита и полученные данные ближе к значениям эталона на 5%.

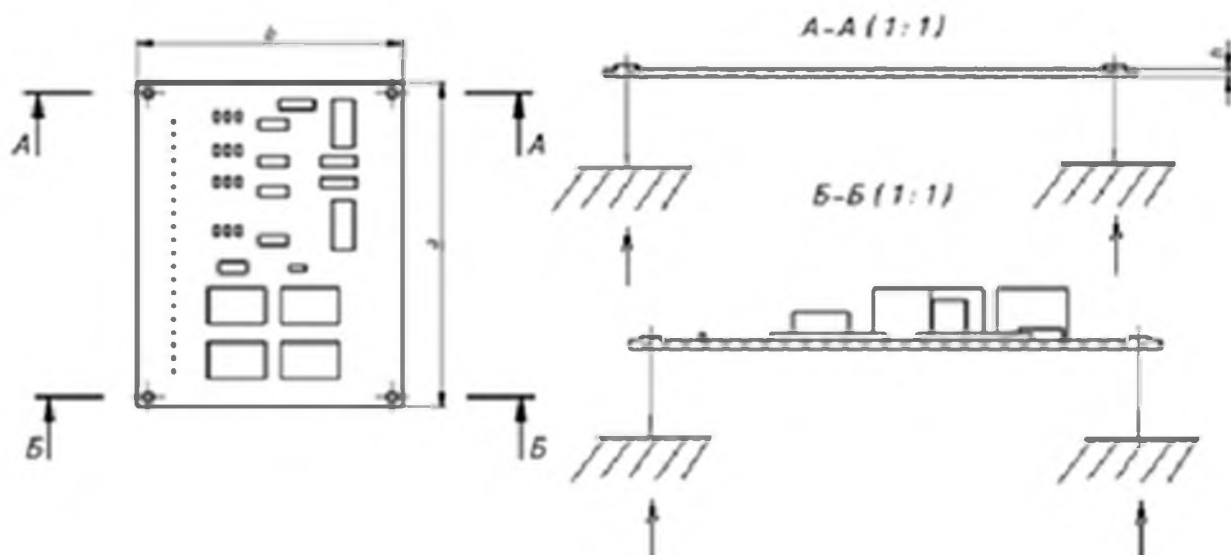
#### 4.3.2 Расчет на воздействие механических ударов

Целью моделирования данного испытания является определение действующих на печатный узел внешних механических перегрузок, а также возникающих максимальных перемещений при действии вибрации.

4.3.2.1 Математическая модель расчета воздействия механических ударов на печатный узел.

Для расчета печатного узла на механический удар будем использовать модель из предыдущих расчетов (см. рисунок 4.5-4.8). Параметры выбраны для аппаратуры, перевозимой автомобильным транспортом, и будут приняты согласно стандарту [30]: длительность ударного импульса – 6 мс, ускорение –  $250\text{м/с}^2$ . Параметры выбраны для аппаратуры, перевозимой автомобильным транспортом. На рисунке 4.35 указано направление воздействия удара.





*Направление воздействия удара*

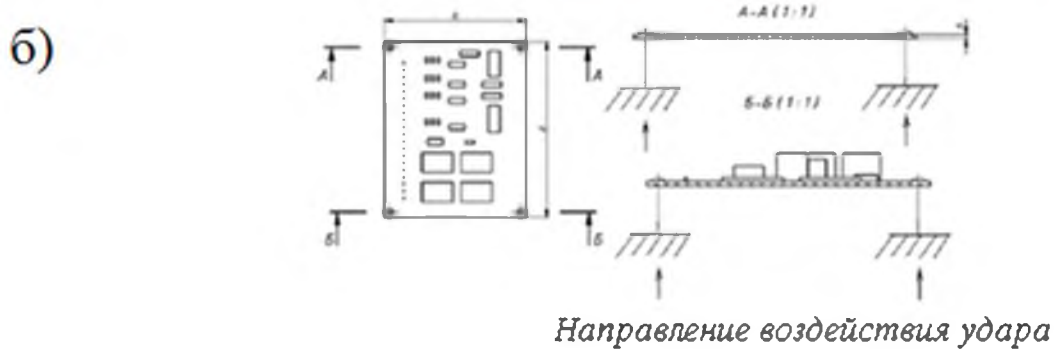
Рисунок 4.35 – Схема закрепления узла и направление воздействия удара

На рисунке 4.36а представлены физические параметры разработанной модели.

На рисунке 4.36б указано направление воздействия удара.

а)

Материал	a	b	h	Плотность	Модуль Юнга			Коэффициент Пуассона			Модуль сдвига
					Ось X	Ось Y	Ось Z	XY	XZ	YZ	
Сталь/стеклопластик фольгированный	160 (мм)	120 (мм)	2 (мм)	2185 (кг/м³)	11 (ГПа)	11 (ГПа)	10 (ГПа)	0,22	0,17	0,17	3400 (МПа)



*Направление воздействия удара*

Рисунок 4.36 – Физические параметры предложенной модели и направление воздействия удара

Произведем аналитический расчет печатного узла согласно литературе [24] и сравним полученные результаты с расчетом прототипа и разработанной моделью.

Максимальное смещение печатного узла во время удара определяется формулой:

$$S_y = \frac{2a_y \sin \pi f_0 t_{иу}}{(2\pi f_0)^2}, \quad (9)$$

где  $a_y$  – ускорение удара, м/с<sup>2</sup>;

$f_0$  – частота собственных колебаний печатного узла, Гц;

$t_{иу}$  – длительность импульса удара, с.

#### 4.3.2.2 Моделирование воздействия ударов на печатный узел

Для расчета печатного узла на воздействие удара следует выбрать тип анализа «Direct Transient Response». В меню «Dynamics Setup» необходимо указать следующие параметры: «Time Step» - время одного шага, «Number of Timesteps» - количество шагов. На рисунке 4.37 представлена настройка временных параметров.

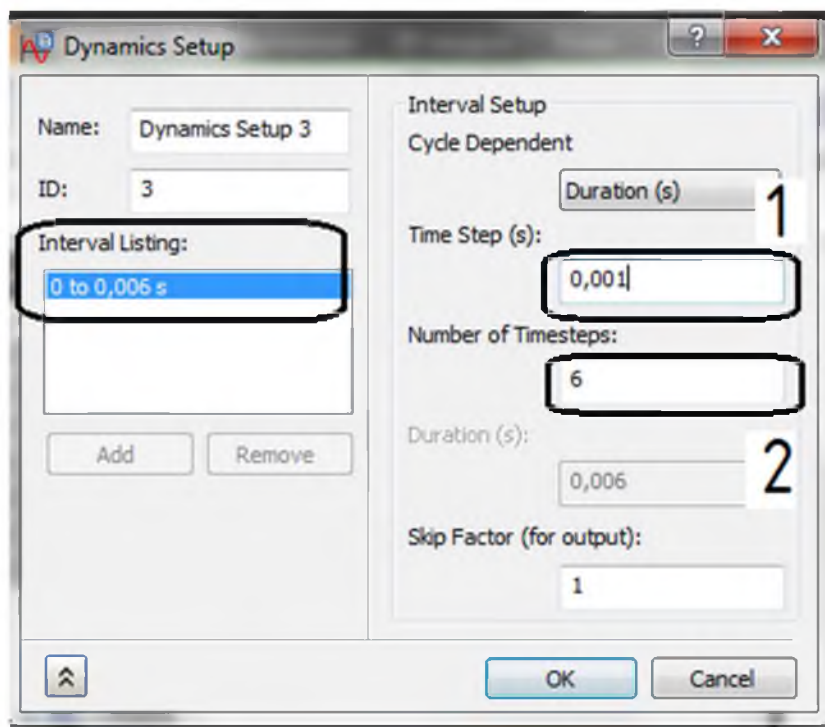


Рисунок 4.37 – Настройка временных параметров

Далее необходимо перейти в меню «Load», указать плоскости, на которые будет воздействовать удар и его направление, выбрать необходимый тип воздействующего фактора и сформировать таблицу с числовыми параметрами. На рисунке 4.38 представлена настройка основных параметров меню «Load».

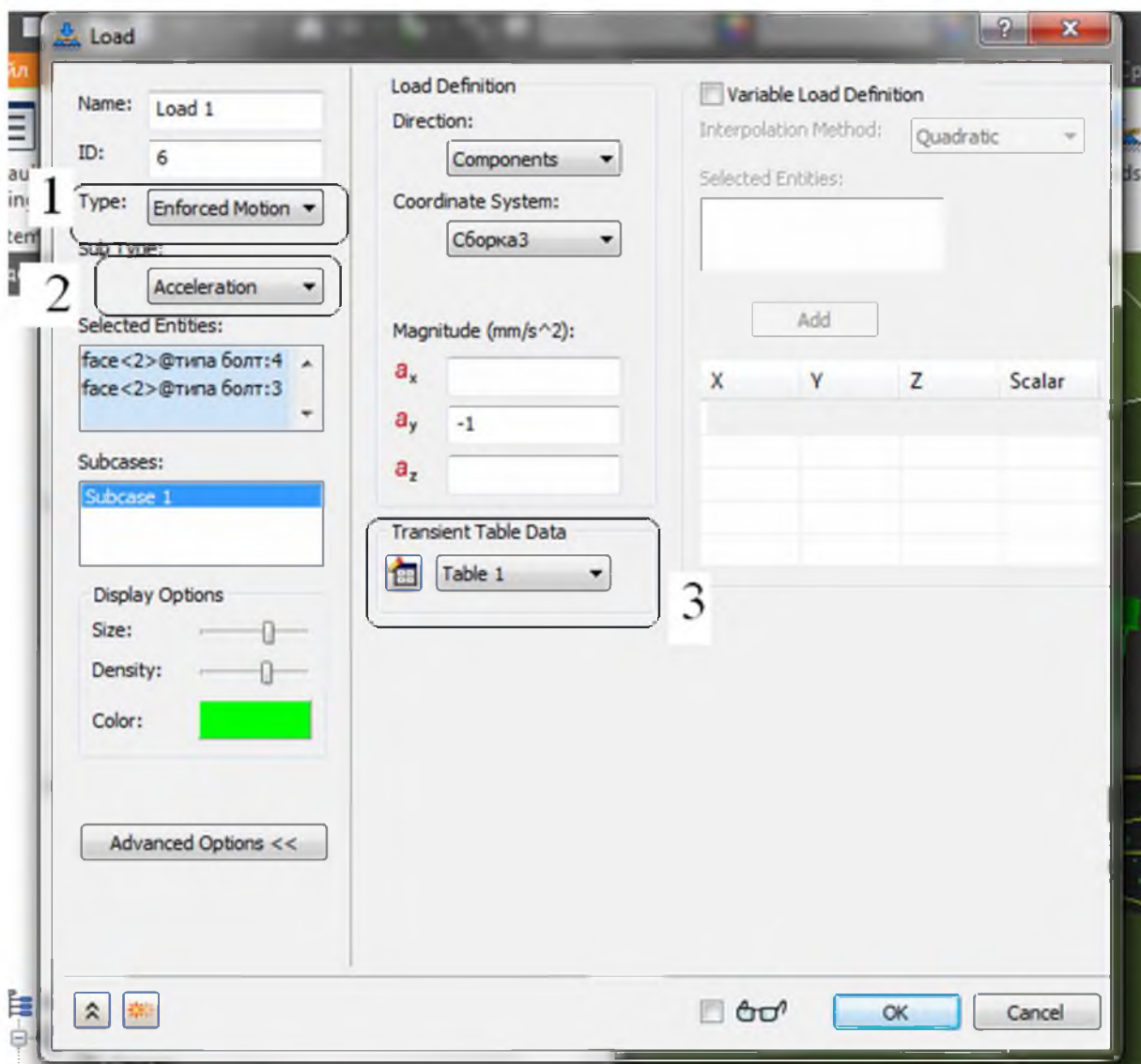


Рисунок 4.38 – Настройка меню «Load»

Сформируем прямоугольный импульс длительностью 6 мс с ускорением  $250 \text{ м/с}^2$ .

На рисунке 4.39 представлены числовые параметры удара.

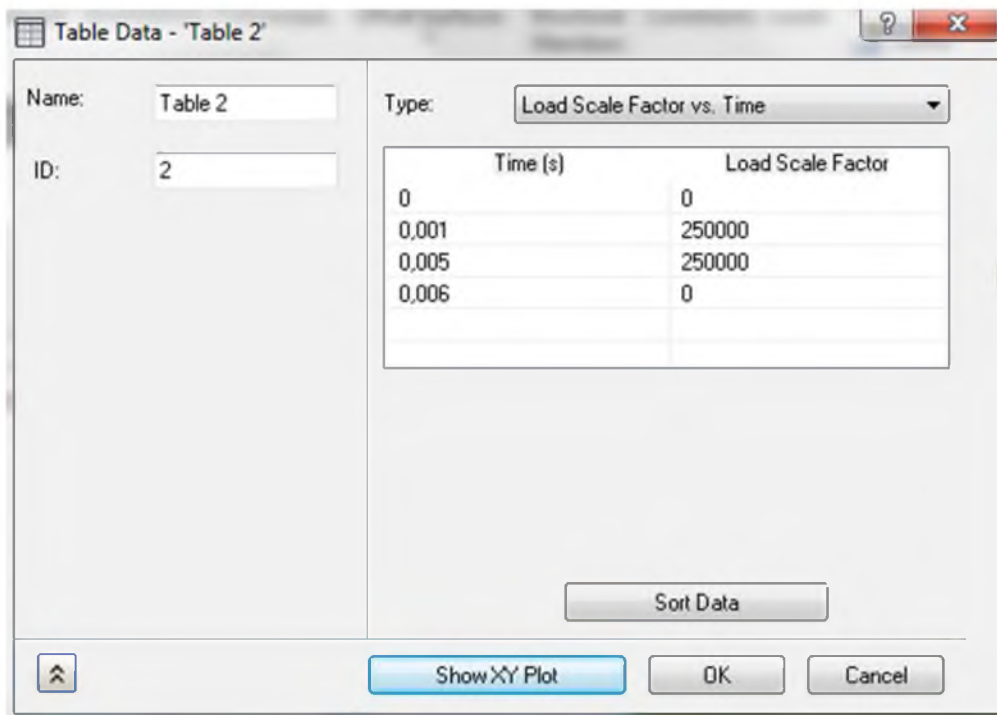


Рисунок 4.39 – Числовые параметры удара

Для отображения графика необходимо перейти по вкладке «Show XY Plot». На рисунке 4.40 представлена зависимость ускорения от времени.

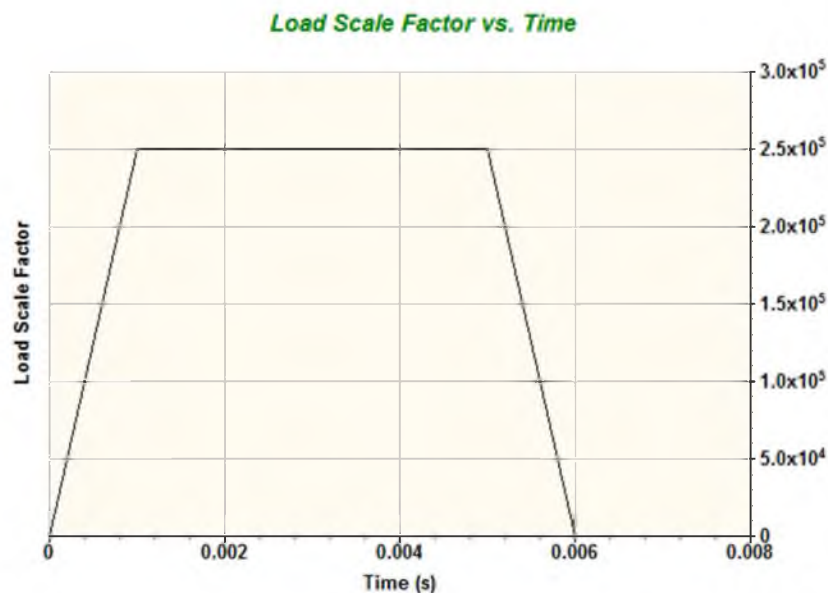


Рисунок 4.40 – Зависимость ускорения от времени

На рисунке 4.41 представлен результат возникающих деформаций в материале печатной платы и радиоэлементов при расчете прототипа.

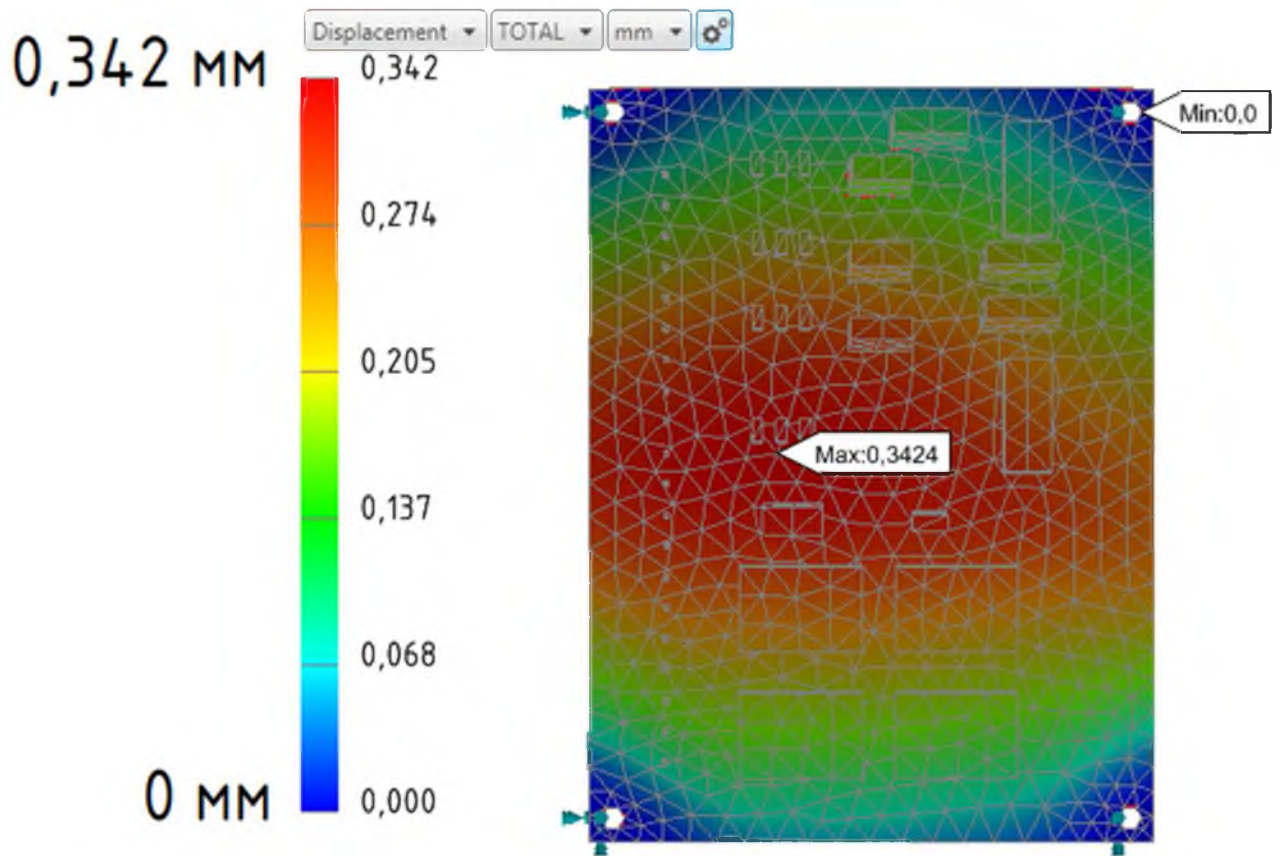


Рисунок 4.41 – Возникающие деформации в прототипе

На рисунке 4.42 представлен результат возникающих деформаций прототипа в изометрии.

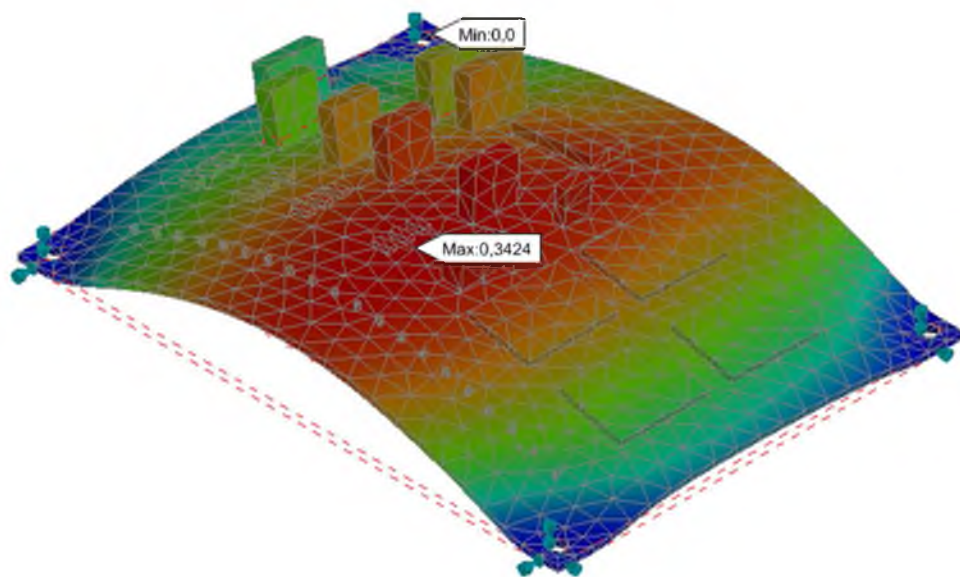


Рисунок 4.42 – Возникающие ускорения в прототипе



На рисунке 4.43 представлен результат возникающих деформаций в материале печатной платы и радиоэлементов при расчете разработанной модели.

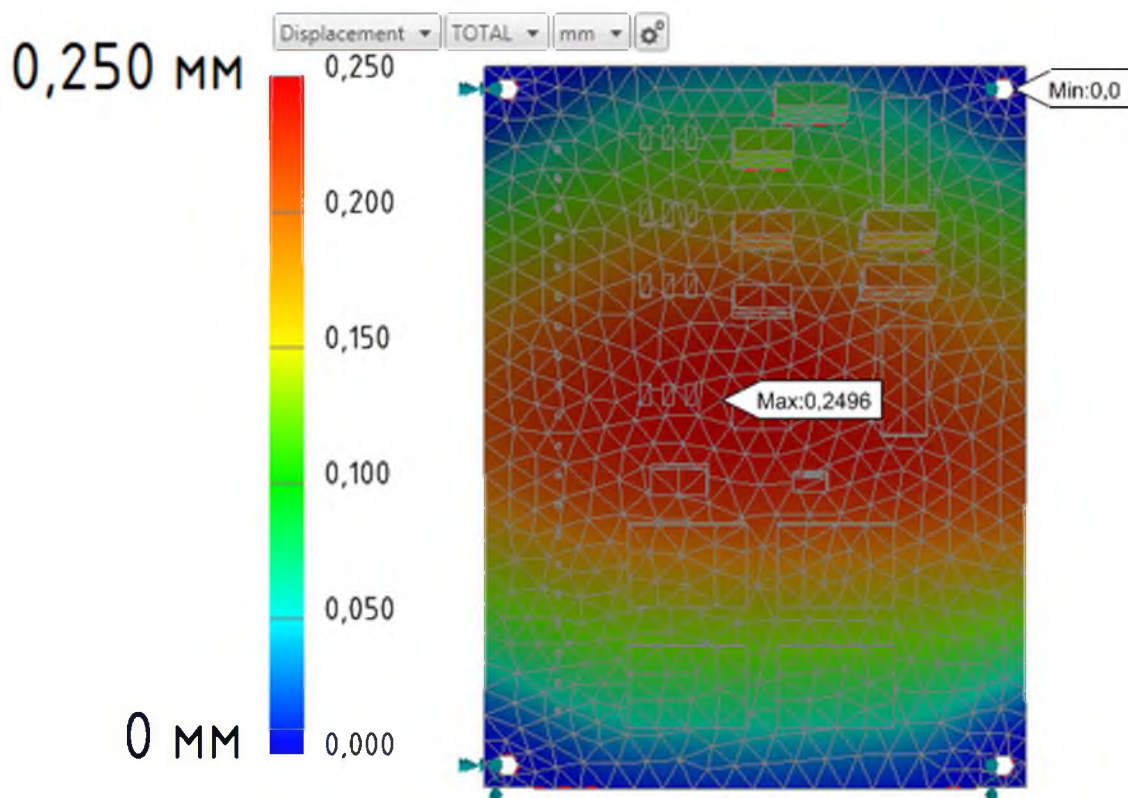


Рисунок 4.43 – Возникающие деформации в разработанной модели

На рисунке 4.44 представлен результат возникающих деформаций разработанной модели в изометрии.

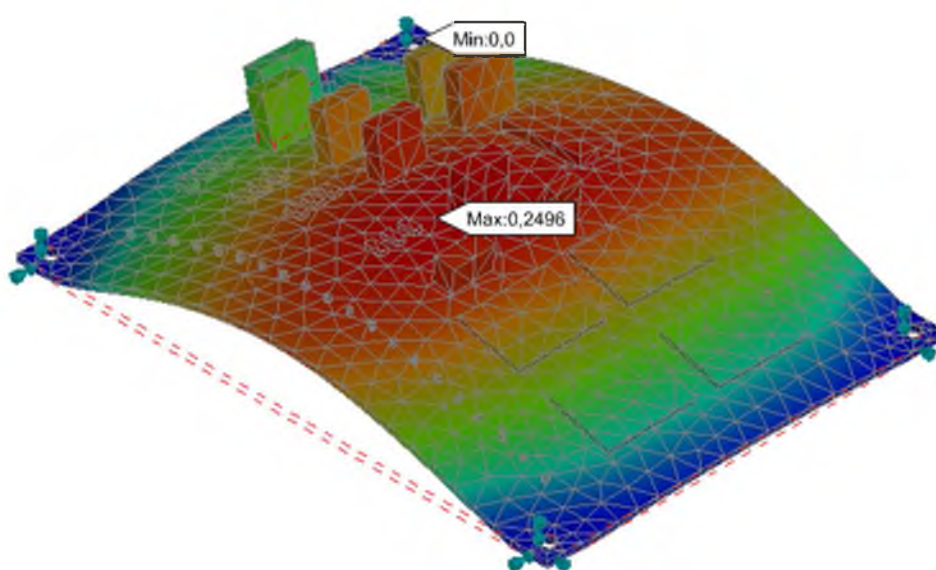


Рисунок 4.44 – Возникающие деформации в предложенной модели


11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ

#### 4.3.2.3 Анализ результатов

Чтобы нагляднее оценить результаты моделирования, создадим таблицу и укажем степень расхождения результатов в процентах.

Таблица 4 – Сравнение результатов моделирования

	Эталон	Прототип	Разработанная модель
Максимальное значение деформации печатного узла	0,206 мм	0,342 мм	0,250 мм
Расхождение с эталоном	0%	<b>66,01%</b>	<b>21,35%</b>

Вывод:

Значения расчета прототипа отличаются от значений эталона на 66%. Это связано с недостаточно точной расчетной моделью прототипа, которая не учитывает физические свойства материала подложки. Новая модель учитывает слоистую структуру стеклотекстолита и полученные данные ближе к значениям эталона на 45%.

#### 4.4 Моделирование механических воздействий на радиоэлектронные блоки

В части моделирования механических воздействий на блоки будут подробно рассмотрены существующие расчетные модели и предложены новые, уточняющие результаты расчета. Далее будут смоделированы резонансы, воздействие вибраций и механических ударов.

##### 4.4.1 Воздействие вибрации

Целью моделирования данного испытания является определение возникающих перегрузок блока для оценки их влияния на работоспособность изделия.





#### 4.4.1.1.1 Математическая модель расчета резонансов блока

Рассмотрим, как влияет контакт деталей на конечный результат расчета. На рисунке 4.46 представлена модель блока. Контакт между деталями для расчета будет принят идеальным.

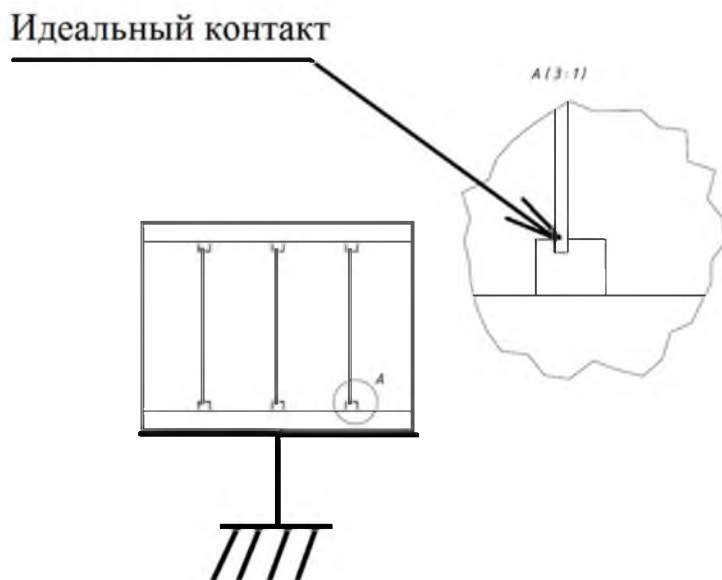


Рисунок 4.46 – Модель контактов блока, принятая для прототипа

На рисунке 4.47 предложена модель, учитывающая такое контактное явление как скользящий контакт.

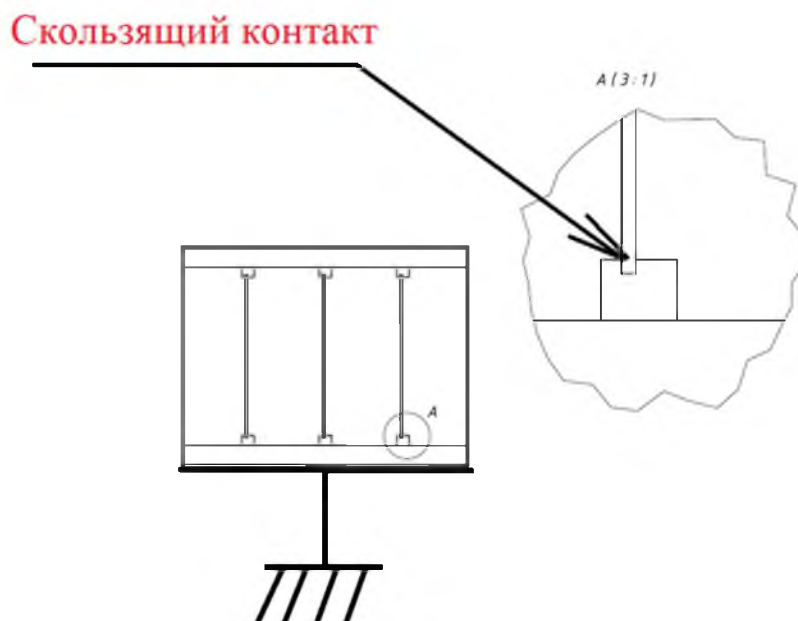


Рисунок 4.47 – Модель контактов блока разработанной модели расчета


11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ

#### 4.4.1.1.2 Расчет собственных частот блока

Расчет резонансных частот будем производить по методике, описанной выше для печатных узлов.

Для расчета прототипа выберем автоматический тип контакта между деталями. Для расчета предложенной модели, вместо автоматического контакта, необходимо вручную установить тип необходимых контактов.

На рисунке 4.48 представлено окно настройки контактов. Для автоматического контакта в разделе «Contacts» необходимо выбрать «Auto», для настройки контактов вручную необходимо перейти в меню «Manual» или «Solver».

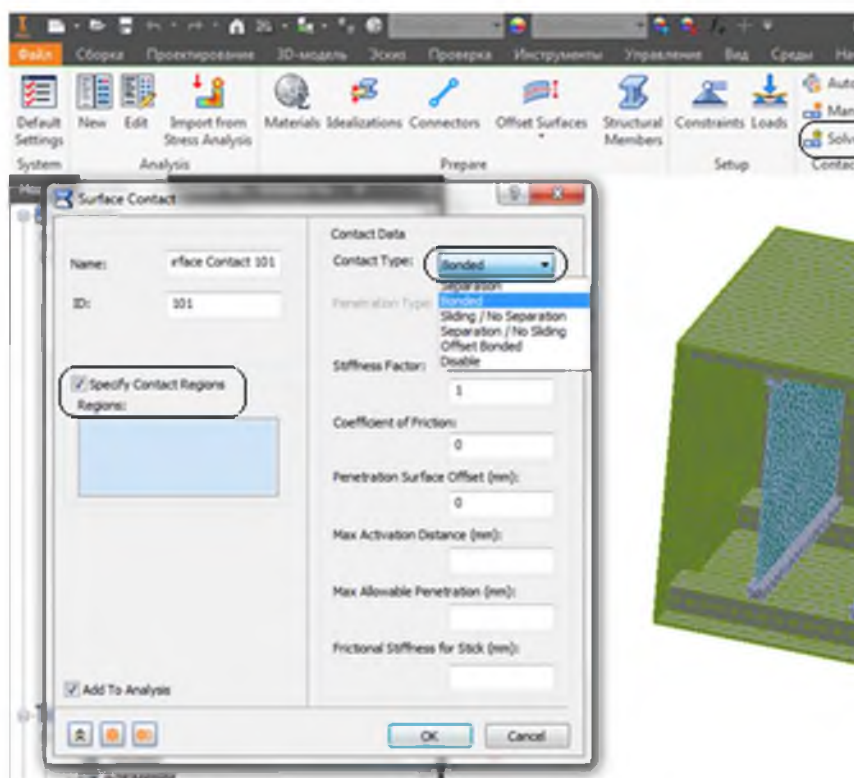


Рисунок 4.48 – Окно настройки контактов

Выберем тип контакта «Sliding». В месте контакта пара может отделиться, и элементы могут перемещаться относительно друг друга.

На рисунке 4.49 представлены результаты моделирования резонансных частот прототипа.

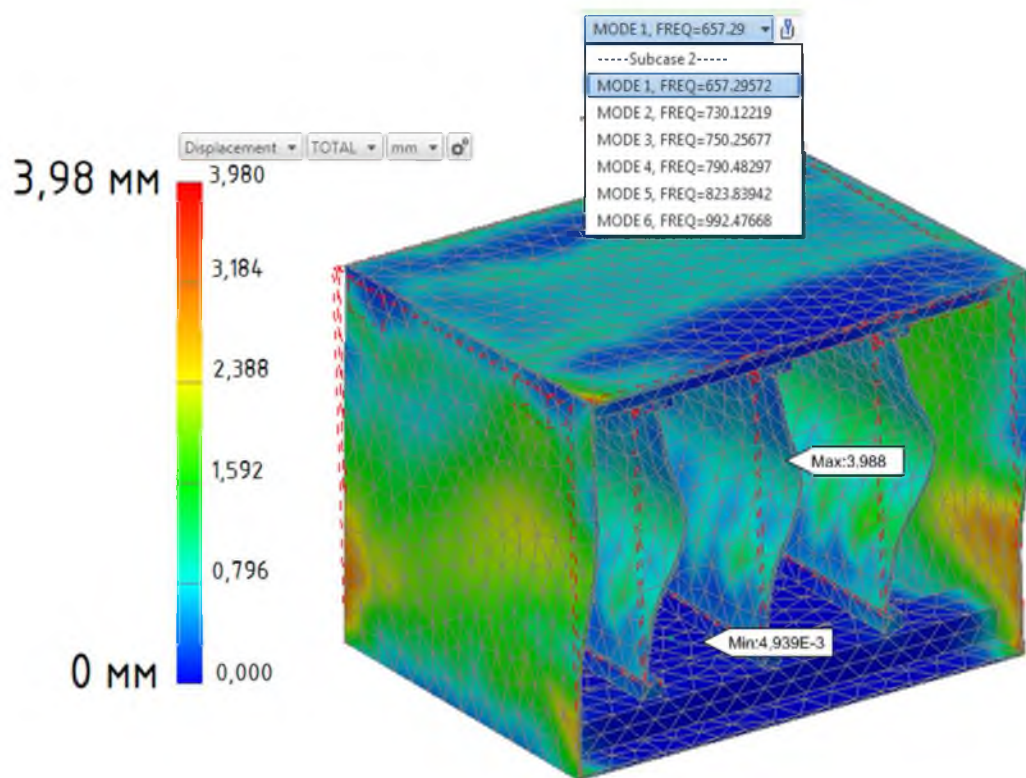


Рисунок 4.49 – Резонансные частоты прототипа

На рисунке 4.50 представлены резонансные частоты разработанной модели

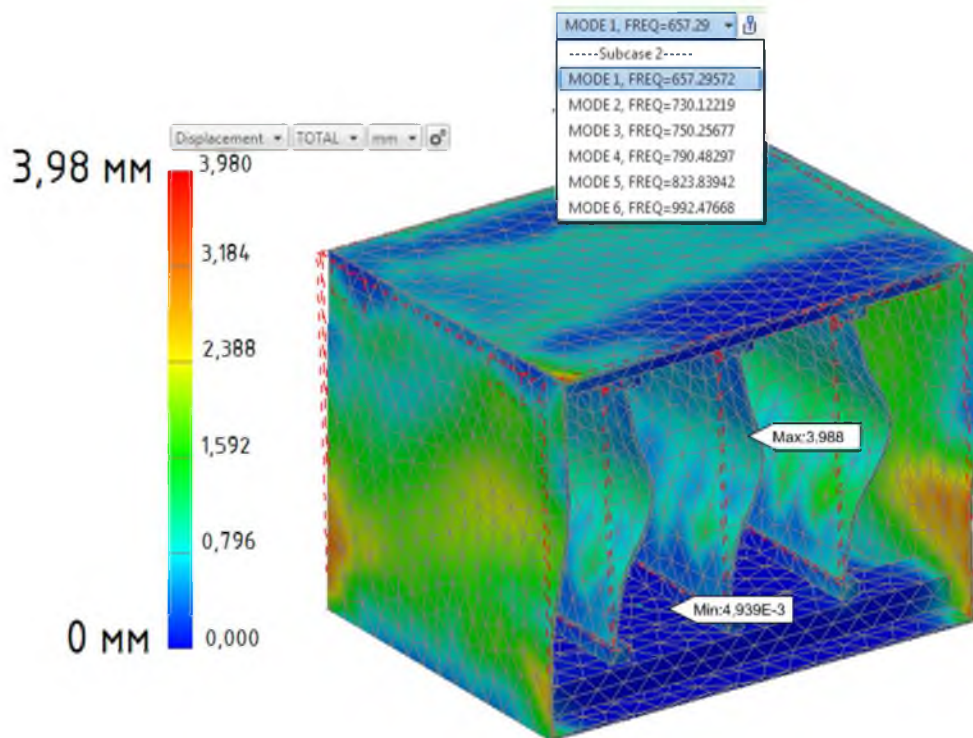


Рисунок 4.50 – Резонансные частоты разработанной модели


11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ

#### 4.4.1.1.3 Анализ результатов моделирования

Значения, полученные при расчете резонансов разработанной модели, не отличаются от значений прототипа. Предложенная модель позволяет учитывать разновидности контактов, что в свою очередь определяет повышенную точность расчета, но на резонанс конструкции данное уточнение не оказывает значимого влияния.

#### 4.4.1.2 Расчет блока на воздействие вибрации

Целью моделирования данного испытания является определение действующих на блок внешних механических перегрузок, а также возникающих максимальных перемещений при действии вибрации.

##### 4.4.1.2.1 Математическая модель воздействия вибрации на блок

Для расчета воздействия случайной вибрации на блок будем использовать расчетные модели, которые использовали для расчета резонансов блока (см. рисунки 4.46, 4.47). Вибрация будет поступать по нормали на всю поверхность нижнего основания блока.

Рассмотрим, как влияет контакт деталей на конечный результат расчета.

Произведем аналитический расчет печатного узла согласно литературе [24] и сравним полученные результаты с расчетом прототипа и разработанной моделью.

Максимальное смещение блока вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{бл}}^{\text{max}} = \frac{a_{\text{в}}}{0,1(2\pi)^2 f_{\text{в}}^2} = \frac{0,25a_{\text{в}}}{f_{\text{в}}^2}, \quad (10)$$

где  $a_{\text{в}}$  – ускорение внешнего источника вибрации,  $\text{м/с}^2$ ;

$f_{\text{в}}$  – частота вибрации внешнего источника, Гц.

#### 4.4.1.2.2 Моделирование воздействия вибрации на блок

Для расчета воздействия синусоидальной вибрации на блок необходимо сменить тип анализа на «Direct Frequency Response». При необходимости отображения полей ускорений необходимо выбрать пункт «Acceleration». Настройка анализа показана на рисунке 4.51.

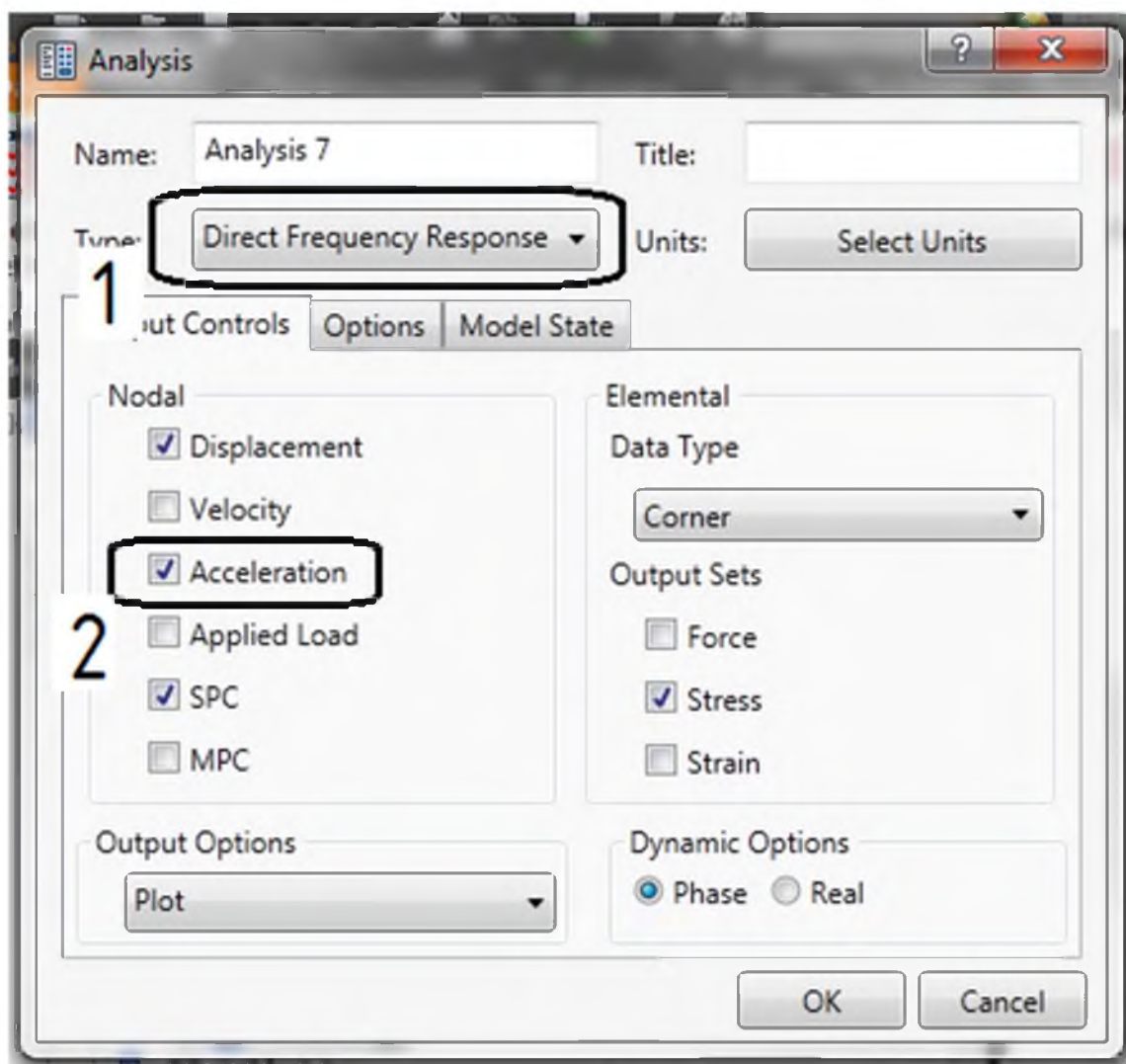


Рисунок 4.51 – Свойства анализа «Direct Frequency Response»

Для настроек параметров анализа необходимо перейти в раздел «Dynamics Setup». Введем исследуемую частоту. Чтобы указать параметр частоты, необходимо во вкладке «Discrete Value» указать необходимые параметры и нажать «Add». На рисунке 4.52 представлена настройка меню «Dynamics Setup».



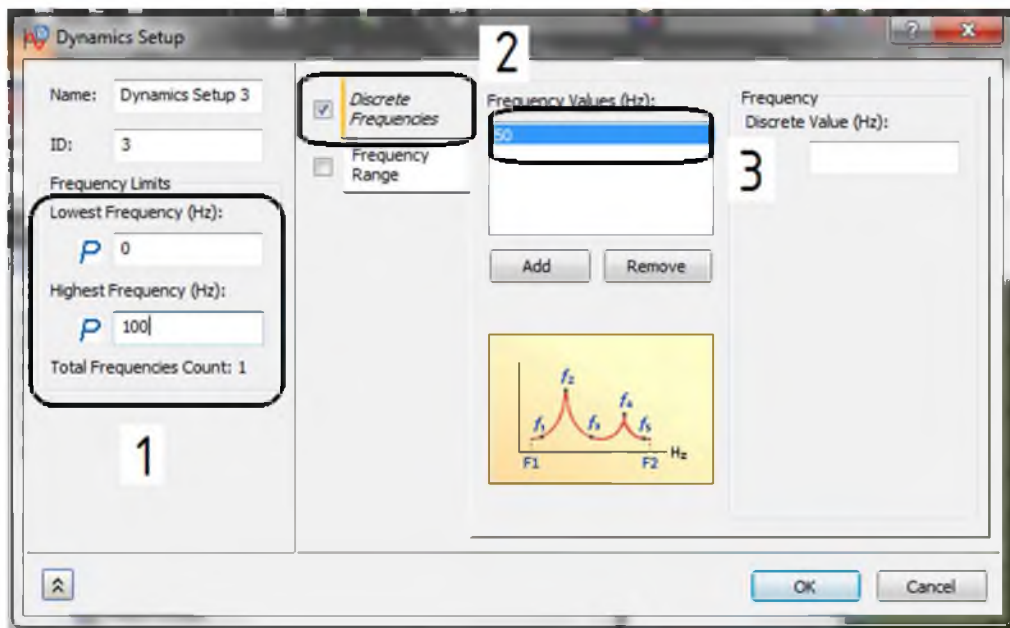


Рисунок 4.52 – Настройка меню «Dynamics Setup»

Далее необходимо перейти в меню «Load», указать плоскости, на которые будет воздействовать вибрация и ее направление, выбрать необходимый тип воздействующего фактора и указать его числовое значение. На рисунке 4.53 представлена настройка основных параметров меню «Load».

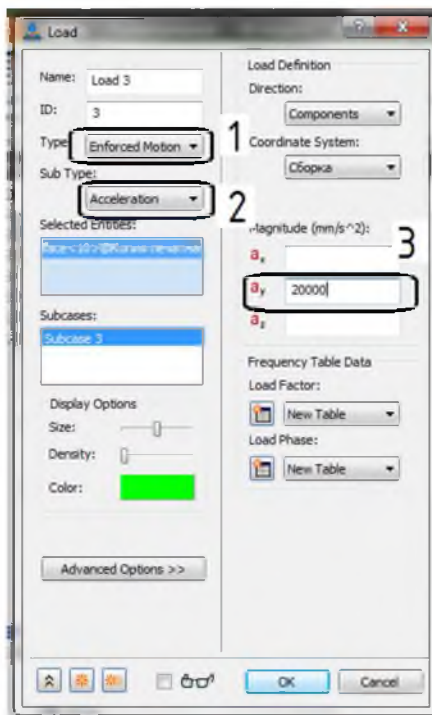


Рисунок 4.53 – Настройка меню «Load»

Настройки конечно-элементной сетки, материалов, закрепления блока оставляем такими же, какие были приняты в предыдущем расчете.

На рисунке 4.54 представлен результат расчета модели прототипа

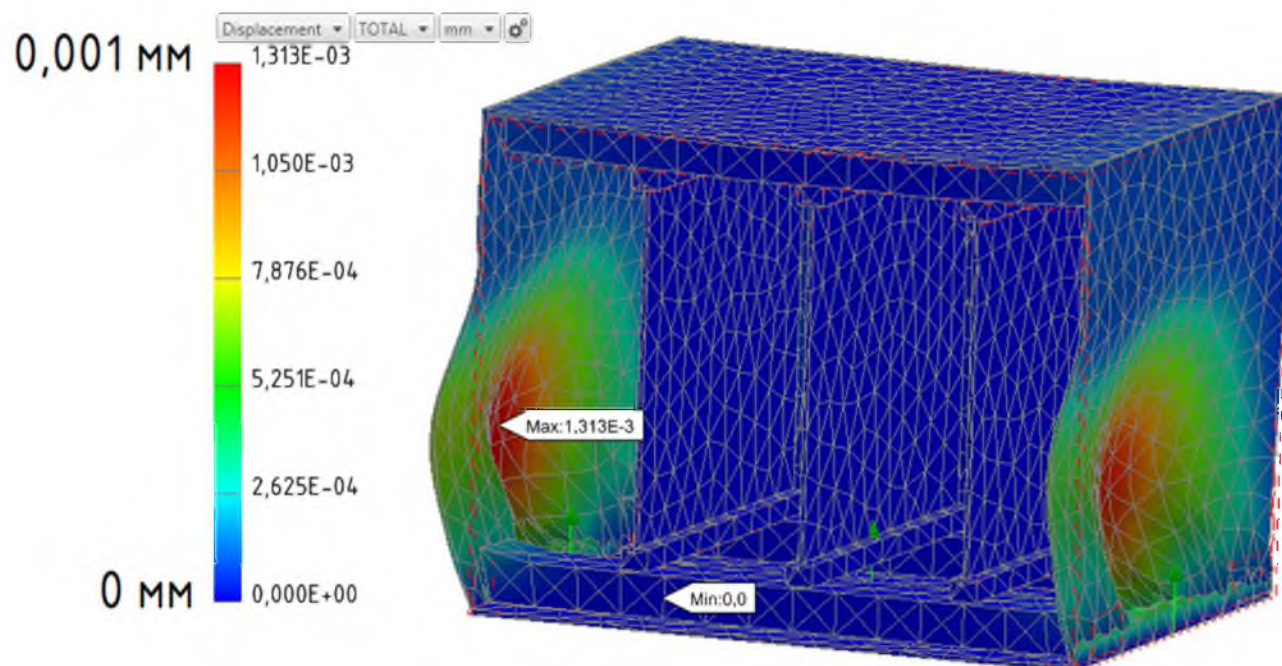


Рисунок 4.54 – Значения деформаций при расчете прототипа

На рисунке 4.55 представлен результат расчета разработанной модели.

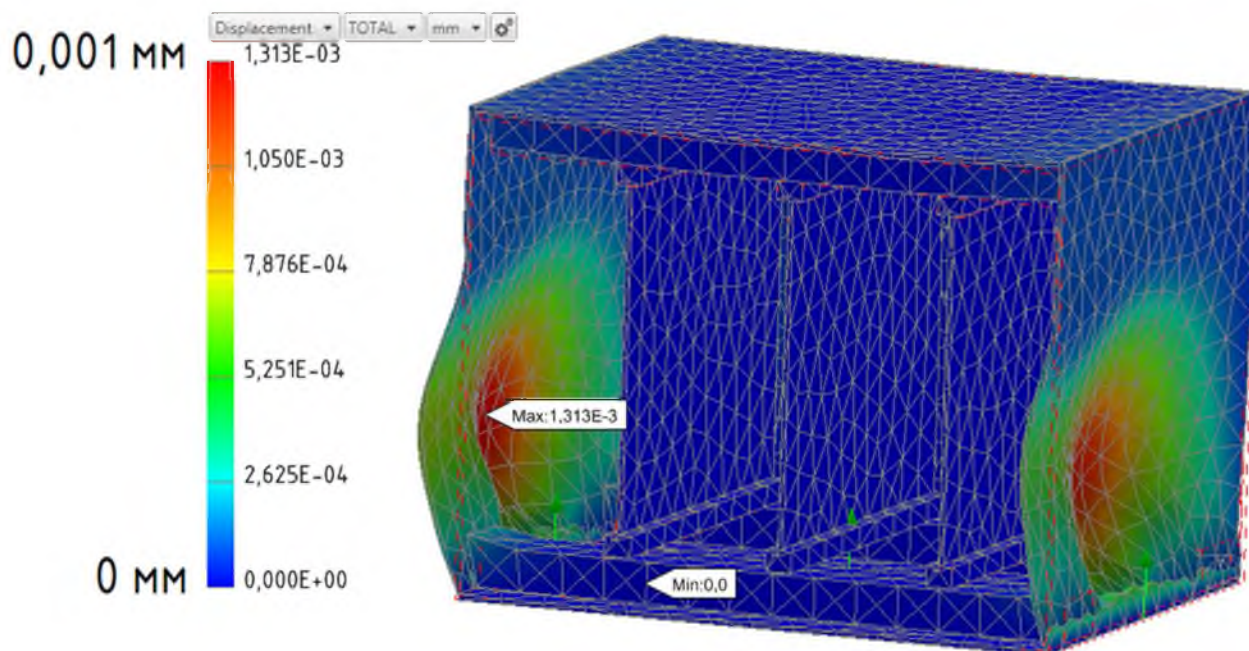


Рисунок 4.55 – Значения деформаций при расчете уточненной модели

#### 4.4.1.2.3 Анализ результатов моделирования

Чтобы нагляднее оценить результаты моделирования, создадим таблицу и укажем степень расхождения результатов в процентах.

Таблица 5 – Сравнение результатов моделирования

	Эталон	Прототип	Разработанная модель
Максимальное значение деформации печатного узла	0,002 мм	0,001 мм	0,001 мм
Расхождение с эталоном	0%	<b>50%</b>	<b>50%</b>

Вывод:

Значения, полученные при расчете воздействия вибрации разработанной модели, не отличаются от значений прототипа. Предложенная модель позволяет учитывать разновидности контактов, что в свою очередь определяет повышенную точность расчета, но на воздействие вибрации данное уточнение не оказывает значимого влияния.

#### 4.4.2 Расчет блока на воздействие механических ударов

Целью моделирования данного испытания является определение действующих на блок внешних механических перегрузок, а также возникающих максимальных перемещений при действии вибрации.

##### 4.4.2.1 Математическая модель расчета воздействия механических ударов на блок

Для расчета воздействия механических ударов на блок будем использовать расчетные модели, которые использовали для расчета резонансов блока (см. рисунки 4.46, 4.47). Удар будет поступать по нормали на всю поверхность нижнего основания блока.

Рассмотрим, как влияет контакт деталей на конечный результат расчета.



#### 4.4.2.2 Моделирование воздействия механических ударов на блок

Настройки расчета будем производить по методике, описанной выше для печатного узла.

Для расчета блока на воздействие удара следует выбрать тип анализа «Direct Transient Response». В меню «Dynamics Setup» необходимо указать следующие параметры: «Time Step» - время одного шага, «Number of Timesteps» - количество шагов. На рисунке 4.56 представлена настройка временных параметров.

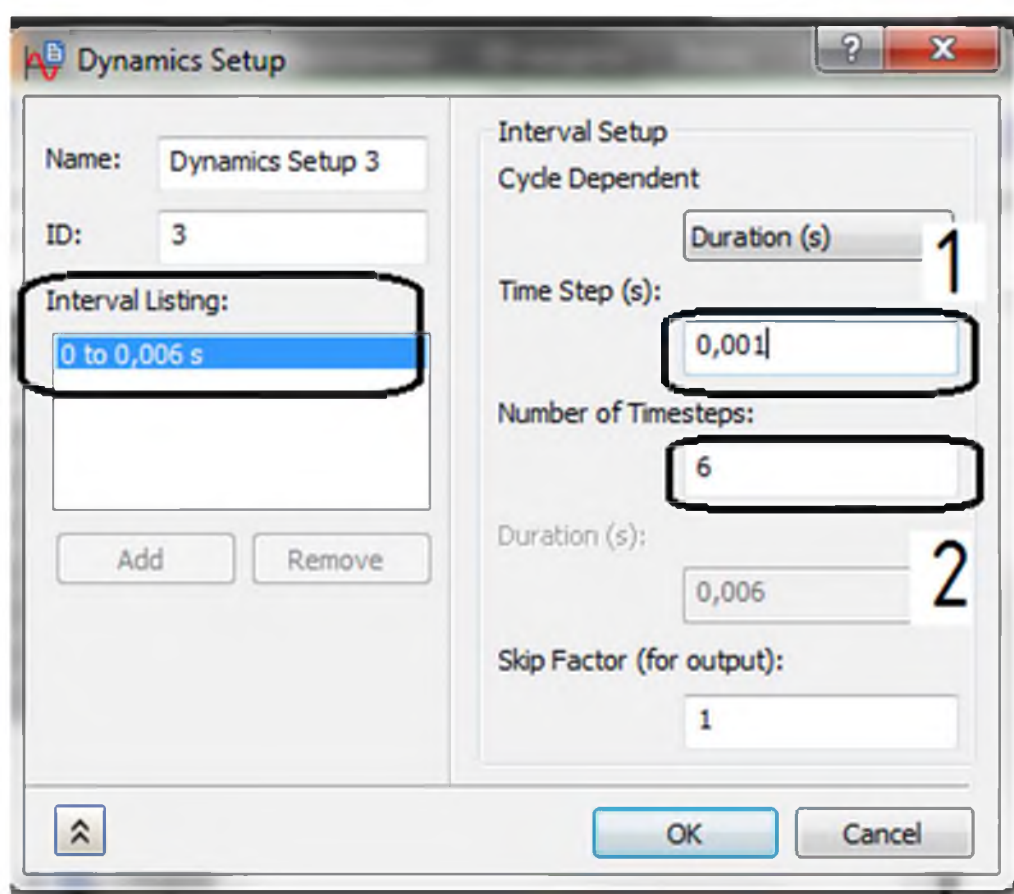


Рисунок 4.56 – Настройка временных параметров

Далее необходимо перейти в меню «Load», указать плоскости, на которые будет воздействовать удар и его направление, выбрать необходимый тип воздействующего фактора и сформировать таблицу с числовыми параметрами. На рисунке 4.57 представлена настройка основных параметров меню «Load».

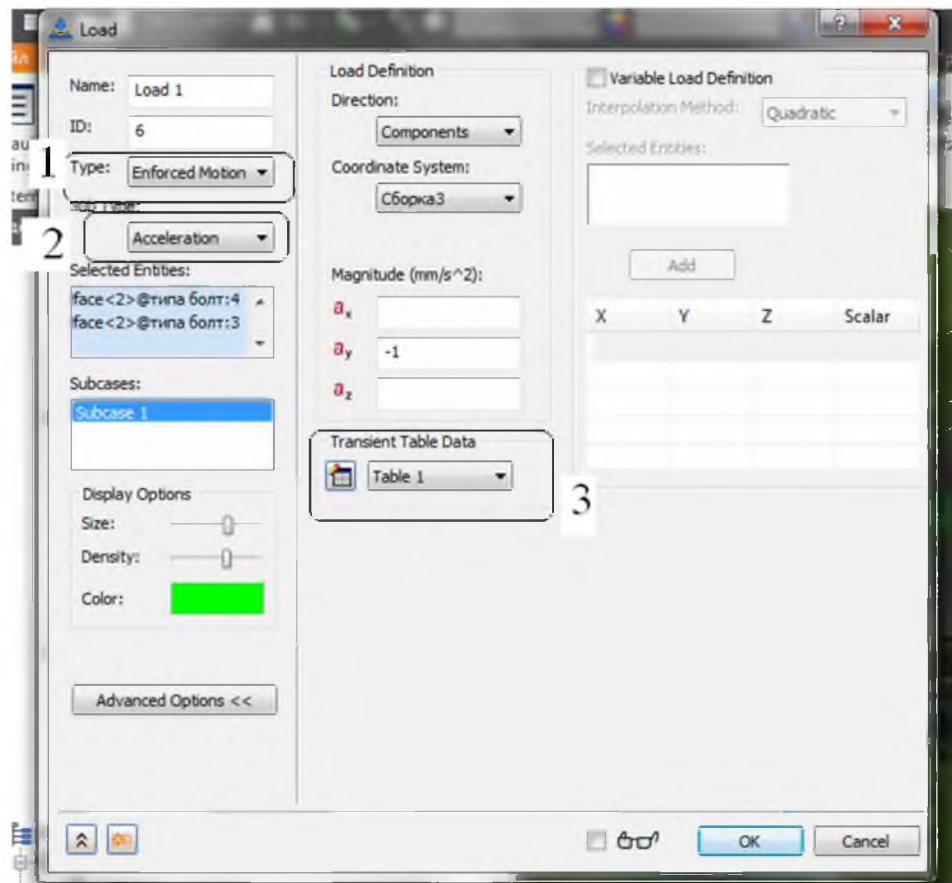


Рисунок 4.57 – Настройка меню «Load»

Сформируем прямоугольный импульс длительностью 6 мс с ускорением  $250 \text{ м/с}^2$ .

На рисунке 4.58 представлены числовые параметры удара.

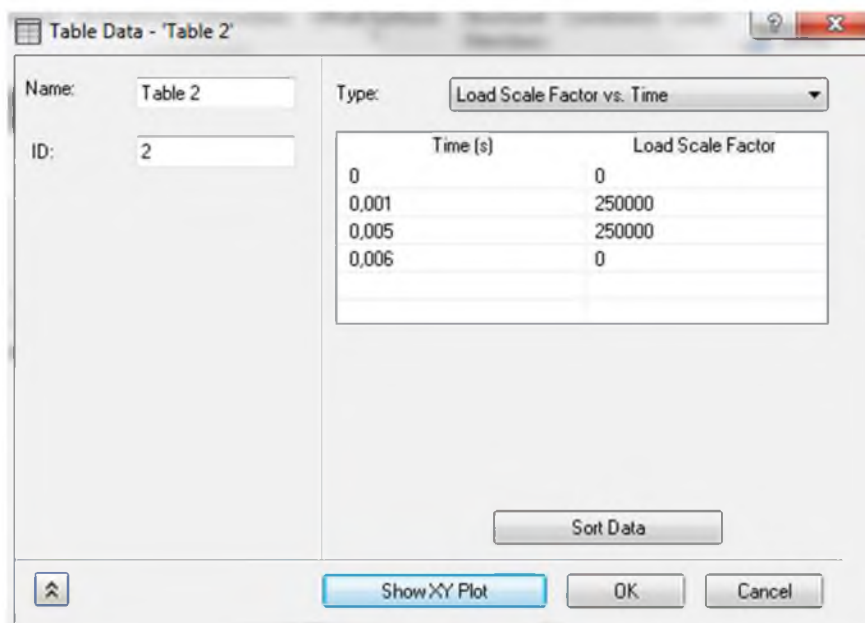


Рисунок 4.58 – Числовые параметры удара

Для отображения графика необходимо перейти по вкладке «Show XY Plot». На рисунке 4.59 представлена зависимость ускорения от времени.

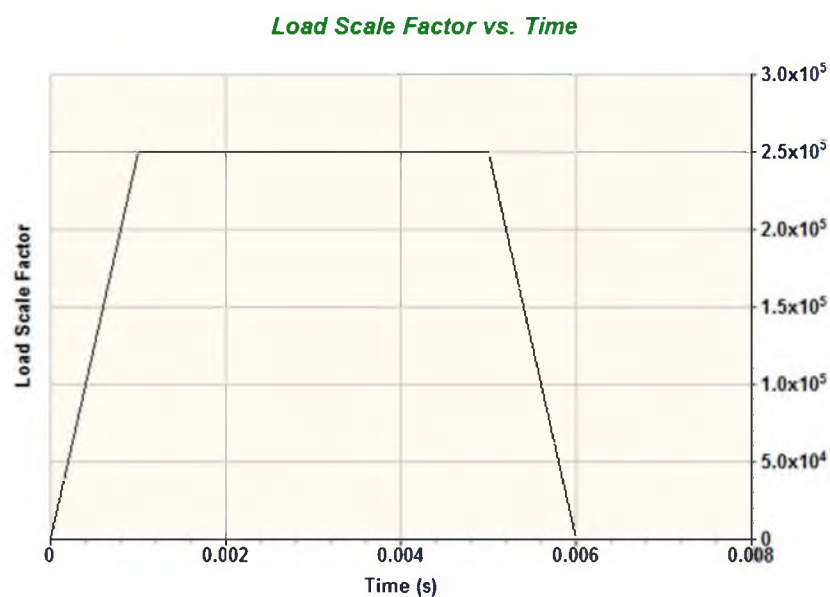


Рисунок 4.59 – Зависимость ускорения от времени

На рисунке 4.60 представлены значения деформаций в прототипе.

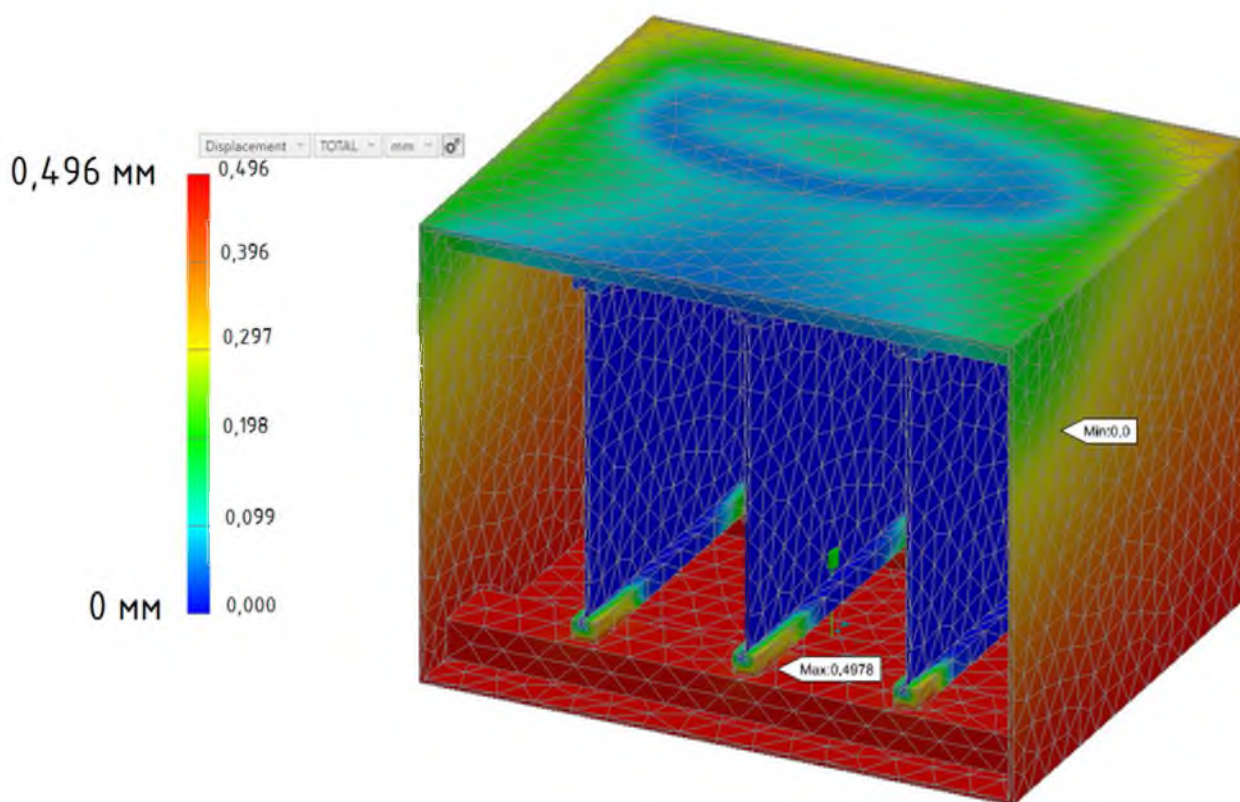


Рисунок 4.60 – Значения деформаций в прототипе

На рисунке 4.61 представлены значения деформаций в разработанной модели.

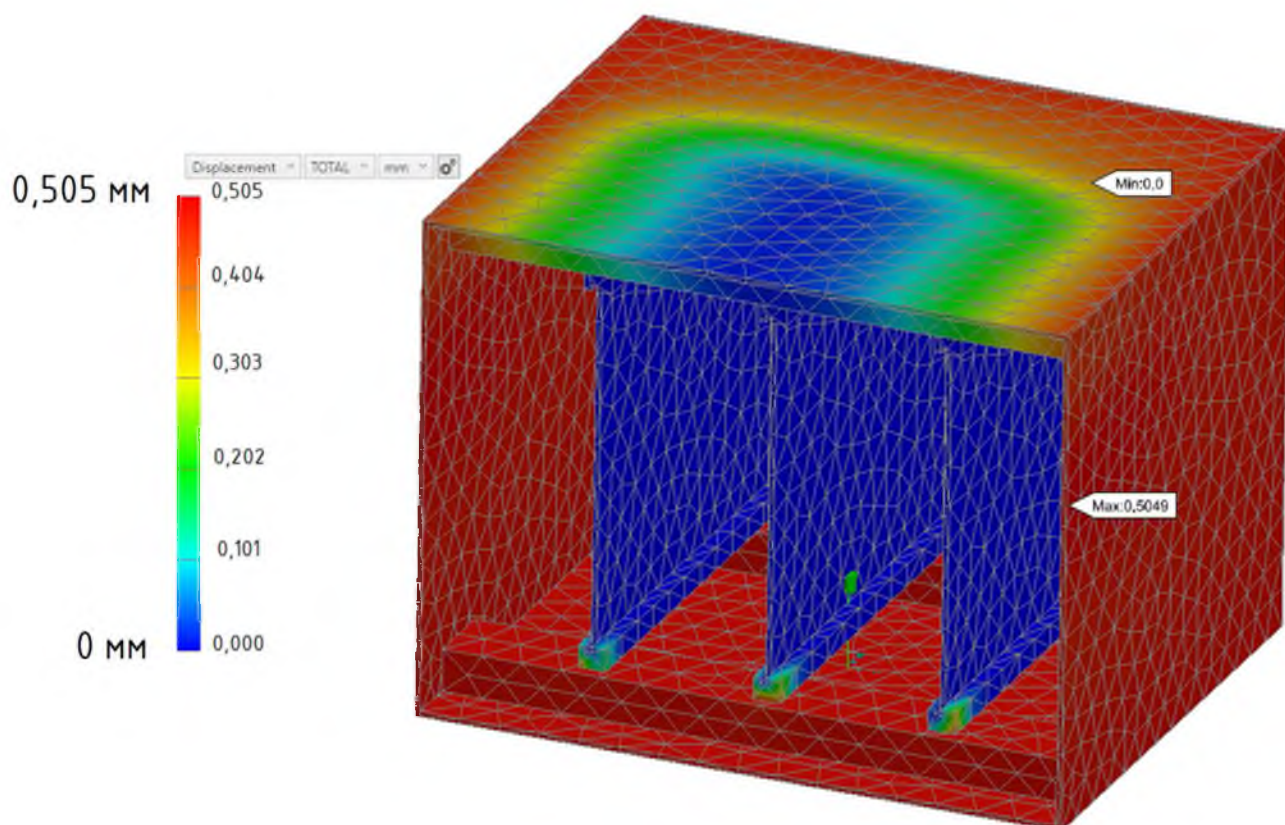


Рисунок 4.61 – Рассчитанные значения деформаций разработанной модели

#### 4.4.2.3 Анализ результатов моделирования

Чтобы нагляднее оценить результаты моделирования, создадим таблицу и укажем степень расхождения результатов в процентах.

Таблица 6 – Сравнение результатов моделирования

	Прототип	Разработанная модель
Максимальное значение деформации печатного узла	0,496 мм	0,505 мм
Расхождение с прототипом	0	<b>1,81%</b>

Вывод:

Значения разработанной модели незначительно отличаются от значений прототипа, поэтому в данном расчете параметром контактных связей можно пренебречь.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа литературы были рассмотрены существующие механические модели расчета блоков и печатных узлов, а так же были предложены новые элементы моделей, которые позволяют учитывать неоднородность структуры материала и разнообразные варианты контактных связей.

На основе моделей разработана методика моделирования механических воздействий на печатный узел и блок в среде Autodesk Nastran In-CAD. В методике расчета поэтапно изложена последовательность действий моделирования.

Разработанная методика позволяет эффективнее оценить физические характеристики изделия, тем самым избежать ошибок и неточностей при конструировании.



12 Кофанов Ю. Н. Информационные технологии теплового и механического моделирования радиоэлектронных средств: учеб.пособие/ Ю. Н. Кофанов, С. Ю. Сотникова. – нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2014. – 87с.

13 Малинский В. Д. Испытания радиоаппаратуры: учебное пособие/ В. Д. Малинский, Д. Н. Ошер, Л.Я. Теплицкий. – М.: издательство «Энергия», 1965. – 440 с.

14 Радиоэлектронная аппаратура и основы ее конструкторского проектирования: учебно-методическое пособие для студентов спец. «моделирование и компьютерное проектирование» и «Проектирование и производство РЭС»/ Н. И. Каленкович, С. М. Боровиков, А. М. Ткачук, Н. С. Образцов. – М.: БГУИР, 2008. –20 с.

15 Захаржевский С. Б. Расчет изделий электроники на механические и тепловые воздействия в САПР Creo: учеб.пособие/ С. Б. Захаржевский, А. Е. Курносенко. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2013. –56 с.

16 Романова Е. Б. Основы конструирования электронных средств: учебно-методическое пособие/ Е. Б. Романова, О. В. Кузнецова, А. Ю. Кузнецов. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. –53 с.

17 Ричард Бейкер. Введение в теорию виброиспытаний. – М.: LDS, 1994. – 44 с.

18 Левицкий А. А. Оценка виброустойчивости печатных плат на основе упрощенных конечно-элементных моделей/ А. А. Левицкий, А. В. Бурмитских// «Современные техника и технологии». – Красноярск.: 2013. – 3 с.

19 Апарников А. Н. Моделирование воздействия внешних механических нагрузок на конструкцию электронного модуля первого уровня в программной системе ANSYS/ А. Н. Апарников// Молодежный научно-технический вестник. – М.: 2015. – 10 с.

20 Алексеев В. Ф. Конструирование радиоэлектронных устройств: лабораторный практикум/ В. Ф. Алексеев, Н. И. Каленкович. – Минск.: БГУИР, 2008. – 36 с.

21 Глудкин О. П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС: Учеб.для вузов/О. П. Глудкин. – М.: Высш. шк., 1991. –336 с.

22 Никонов К.П. Расчет в среде SolidWorks механических воздействий на датчик давления для испытательного оборудования авиационной техники/ К. П. Никонов// Электронный журнал «Труды МАИ», выпуск №70. – М.:2015. – 20с.

11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ

Лист

65

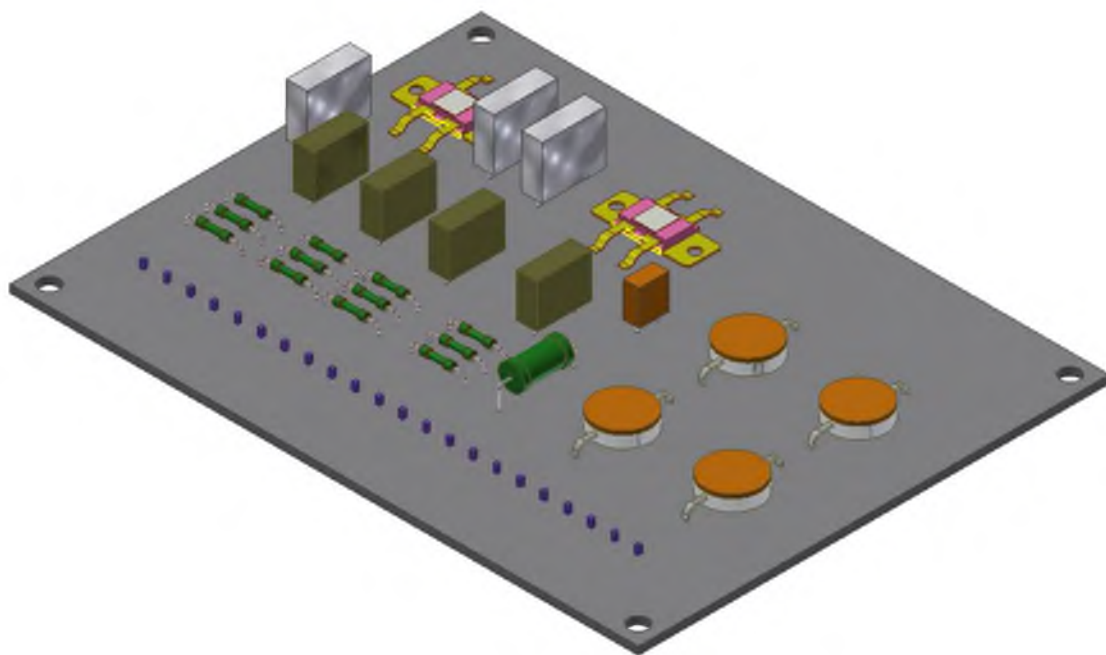




ПРИЛОЖЕНИЕ А

3D-модели печатного узла и блока

					11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ	Лист
						67



3D-модель печатного узла



3D-модель блока


11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Методы испытаний физических параметров печатных плат, печатных узлов и блоков РЭА

					11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ	Лист
						69

## Методы испытаний физических параметров печатных плат, печатных узлов и блоков РЭС

ЮУрГУ  
Кафедра КиПР

### Классификация механически испытаний печатных плат по ГОСТ Р 55744-2013

- 1. Определение предела прочности при растяжении и удлинении медного покрытия
- 2. Определение прочности на отслаивание проводников
- 3. Определение прочности на отрыв контактных площадок неметаллизированных отверстий
- 4. Определение прочности на вырыв покрытий из сквозного металлизированного отверстия
- 5. Контроль адгезии паяльной маски (метод липкой ленты)

### Классификация механически испытаний печатных плат по ГОСТ Р 55744-2013

- 1. Контроль адгезии металлического покрытия (метод липкой ленты)
- 2. Контроль адгезии металлического покрытия (метод полировки)
- 3. Определение обрабатываемости паяльной маски
- 4. Плоскостность
- 5. Испытание на виброустойчивость, нежесткая основа
- 6. Испытание на ударную устойчивость печатных плат

### Классификация механически испытаний печатных узлов и блоков РЭС ГОСТ 16019-2001

- 1. Испытание на воздействие синусоидальной вибрации
- 2. Испытание на воздействие механических ударов
- 3. Испытание на свободное падение

#### Определение предела прочности при растяжении и удлинении медного покрытия

**Что регламентирует стандарт?** Испытание регламентирует определение прочности на растяжение и удлинения медного покрытия в процентах посредством тестирования механического усилия.

**Объект исследования** В качестве объекта испытания готовят образцы из гальванически осажденной меди из электролита, представляющие собой прямоугольные полоски в виде "собачьей кости" размерами 13x150 мм, толщиной 0,05-0,1 мм.

#### Определение предела прочности при растяжении и удлинении медного покрытия

**Основные этапы испытаний:**

1. На подготовленных образцах в их узком месте с помощью прецизионного измерительного устройства делают отметку 50 мм по длине с точностью 0,01 мм.
2. Подбирают соответствующий предел нагрузки для измерителя растяжения в мегапаскалях так, чтобы ожидаемое усилие было в приемлемых пределах нагрузки для испытываемого образца по формуле, представленной ниже.

$$\text{Предел прочности на растяжение} = \frac{\text{Максимальная нагрузка, Н}}{\text{Средняя площадь поперечного сечения, мм}^2}$$

#### Определение предела прочности при растяжении и удлинении медного покрытия

**Основные этапы испытаний:**

1. Образец разрушают в зажимном приборе.
2. Удлинение покрытия можно определить по расстоянию между метками, с помощью измерительного прибора
3. За искомое значение принимают среднее из пяти показаний.

#### Определение прочности на отслаивание проводников

**Что регламентирует стандарт?** Испытание позволяет определить величину адгезии проводников к материалу основания печатной платы при нормальных атмосферных условиях.

**Объект исследования** Испытание следует проводить на прямых проводниках шириной не менее 0,8 мм, длиной - более 75 мм.

Определение прочности на отслаивание проводника

**Основные этапы испытания:**

1. Перед испытанием с помощью скальпеля один конец проводника азурито отрезают от основания платы на длину около 10 мм.

Скальпель  
≈ 10 (мм)

Определение прочности на отслаивание проводника

**Основные этапы испытания:**

2. Отделенный конец проводника захватывают по всей ширине зажимом тестера, а затем перпендикулярно поверхности платы прикладывают постепенно увеличивающееся усилие, чтобы проводник начал отслаиваться от основания печатной платы с постоянной скоростью.
3. Испытание продолжают до тех пор, пока отслоившийся участок проводника не достигнет длины около 25 мм.

Направление усилия  
≈ 25 (мм)

Определение прочности на отслаивание проводника

**Основные этапы испытания:**

1. За прочность на отслаивание проводника от основания печатной платы принимают минимальное значение силы на единицу ширины, необходимое для отслаивания проводника, полученное при испытании по крайней мере четырех проводников.

Определение прочности на отрыв контактных площадок неметаллизированных отверстий

**Основные этапы испытания:**

1. Испытание и обеспечивает контроль длины контактных площадок к основанию печатной платы после отрыва пайки.
2. Испытание проводят на группах контактных площадок, отнесенных от прилегающих проводников.

Определение прочности на отрыв контактных площадок неметаллизированных отверстий

**Основные этапы испытания:**

1. В отверстия, расположенные в центре контактных площадок, впаивают отрезки проволочек.

Определение прочности на отрыв контактных площадок неметаллизированных отверстий

**Основные этапы испытания:**

2. Усилие прикладывают до полного отрыва контактной площадки.
3. За прочность на отрыв контактных площадок принимают минимальный результат, полученный при отрыве десяти испытанных контактных площадок от материала основания.

Определение прочности на вырыв покрытий из сквозного металлизированного отверстия

**Основные этапы испытания:**

1. Метод позволяет оценить способность изоляционных металлизированных отверстий без контактных площадок выдерживать неоднократные перепаи.
2. В качестве объекта испытаний используют тест-купины или головки паяльничка с определенным филом. Металлизированные отверстия без контактных площадок.

Определение прочности на вырыв покрытий из сквозного металлизированного отверстия

**Основные этапы испытания:**

1. Перед испытаниями в испытуемые отверстия впаивают облуженные отрезки проволоки, повторяя эту операцию несколько раз. Конец проволоки вставляют в отверстие так, чтобы он выступал на противоположной стороне образца на расстояние не менее 1,5 мм. Выступающий конец проволоки должен быть прямым.



**Определение прочности на разрыв заливки в области металлизированной поверхности** Печатная плата

**Основные этапы испытания:**

- Усилие прикладывают с постепенным увеличением до тех пор, пока металлизация отверстия не отделится от материала основы.
- За прочность на разрыв принимают минимальный результат, полученный при испытании десяти отверстий.

Отделение металлизации

**Контроль адгезии паяльной маски (метод липкой ленты)** Печатная плата

**Что рекомендуют испытание?** • Метод применяют для контроля адгезии паяльной маски. Контроль адгезии проводят как перед пайкой, так и после пайки печатных плат.

**Объект испытания** • В качестве образца используют тест-купон

**Контроль адгезии паяльной маски (метод липкой ленты)** Печатная плата

**Основные этапы испытания:**

- На купон наносят металлическое покрытие, применяемое в технологическом процессе изготовления печатных плат, которое затем покрывают паяльной маской.
- Отрезок липкой ленты длиной 50 мм прижимают к поверхности тест-кулона без воздушных пузырьков. Липкую ленту следует располагать поперек образца.

**Контроль адгезии паяльной маски (метод липкой ленты)** Печатная плата

**Основные этапы испытания:**

- Удаление пленки проводят быстрым отрывом ее под прямым углом к поверхности образца.
- Затем проводят визуальный осмотр поверхности пленки и поверхности тест-кулона для проверки наличия отслоения маски от образца.

**Контроль адгезии металлического покрытия (метод липкой ленты)** Печатная плата

**Что рекомендуют испытание?** • Метод применяют для оценки адгезии металлического покрытия к основному металлу. Оценку проводят независимо от толщины, твердости или пластичности металлического покрытия.

**Объект испытания** • В качестве образца выбирают участок печатной платы с проводящим покрытием. Испытуемая площадь должна быть не менее 1 см<sup>2</sup>

• Методика проведения испытания идентична испытанию «Контроль адгезии паяльной маски (метод липкой ленты)»

**Контроль адгезии металлического покрытия (метод полировки)** Печатная плата

**Что рекомендуют испытание?** • Метод позволяет оценить способность металлического покрытия выдерживать напряжения, возникающие при полировке, которые могут иметь место при эксплуатации, например на контактных контактах.

**Объект испытания** • Испытания проводят на участках готовых печатных плат с гальваническим покрытием. Испытуемая площадь с гальваническим покрытием диаметром 6-6,5 мм с гладким периферийным кромкой

**Контроль адгезии металлического покрытия (метод полировки)** Печатная плата

**Основные этапы испытания:**

- Участок проводящего рисунка печатной платы с гальваническим покрытием подвергают интенсивному трению с нажимом концом стержня в течение 15 с. Прикладываемое усилие должно обеспечивать полировку поверхности покрытия.
- Испытуемый участок подвергают визуальному осмотру.

**Определение обрабатываемости паяльной маски** Печатная плата

**Что рекомендуют испытание?** • Метод позволяет оценить возможность механической обработки печатных плат с покрытием паяльной маски

**Объект испытания** • Для испытаний используют десять образцов с покрытием паяльной маски, три из которых перед испытаниями должны пройти обработку в указанных условиях

Для проверки качества обработки на каждом образце делают по три отпечатка, прикладывая форму нажимной кромки кальки вертикаль, стороны каждой образцы делают против края каждого образцы. Для проверки обрабатываемости делают по одному отсчету штампа, применяя дискретность: один отсчет, чтобы сделать отсчет на каждом образце.

После обработки проводят визуальный осмотр образцов на наличие сколов, трещин, повреждений в слое меди



**Плоскостность** Печать платы

Плоскостность – один из важнейших критериев качества ПП. Критерий плоскостности определяется двумя параметрами: изгиб и кручение.

Изгиб печатной платы характеризуется цилиндрическим или сферическим искривлением. То есть для прямоугольной платы все четыре угла находятся в одной плоскости.

Точка А, В, С касаются тестовой плоскости

С постоянным усилием, прикладываемым только к одному углу ПП

**Плоскостность** Печать платы

Кручение – это деформация ПП, параллельная одной из диагоналей, таким образом, при этом виде деформации один из углов печатной платы не находится в одной плоскости с тремя другими.

Точки А, В, С касаются тестовой плоскости

С постоянным усилием, прикладываемым только к одному углу ПП

**Плоскостность, измерение изгиба** Печать платы

**Основные этапы испытания:**

- Тестируемый образец размещают на плоской поверхности изгибом вверх. К образцу прикладывается достаточное усилие, чтобы распрямить его. Затем измеряют и записывают значения длины (L) и ширины (W) образца.

**Плоскостность, измерение изгиба** Печать платы

**Основные этапы испытания:**

- Для плат прямоугольной формы используют габаритные размеры.
- Ко всем четырем углам образца прикладывается усилие, достаточное для того, чтобы обеспечить контакт углов образца с тестовой плоскостью.

Касается тестовой поверхности. Прикладывает усилие только в углах ПП. Касается тестовой поверхности.

Значение параметра «изгиб» рассчитывают по следующим формулам:

- по стороне L –  $B_L = (R_L/L) \times 100\%$ ;
- по стороне W –  $B_W = (R_W/W) \times 100\%$ .

**Плоскостность, измерение кручения** Печать платы

**Основные этапы испытания:**

- Тестируемый образец размещают на плоской поверхности изгибом вверх. К образцу прикладывается достаточное усилие, чтобы распрямить его. Измеряют и записывают значения диагональной размерности (D) образца.
- Образец располагают на тестовой плоскости, изгибом вниз, так, чтобы три угла образца касались плоскости.
- Измеряют расстояние между четвертым углом образца и плоскостью.

**Плоскостность, измерение кручения** Печать платы

**Основные этапы испытания:**

- Значение параметра «кручение» рассчитывается по следующей формуле:

$$T = (R / (2 \times D)) \times 100\%$$

- Полученные значения параметров «изгиб» и «кручение» не должны превышать 0,75% для плат с элементами поверхностного монтажа и 1,5% - для остальных печатных плат.

**Испытание на виброустойчивость печатных плат** Печать платы

Цель: проверить надежность платы.

Испытание позволяет установить способность печатных плат сохранять параметры в пределах значений в соответствии с техническими требованиями на изделие в условиях воздействия вибрации.

**Испытание на виброустойчивость печатных плат** Печать платы

**Основные этапы испытания:**

- Для испытаний применяют вибрационную установку, обеспечивающую получение в контрольной точке синусоидальной вибрации с параметрами, установленными в стандарте, устанавливающим технические требования к печатным платам.


### Испытание на виброустойчивость печатных плат

**Основные этапы испытания:**

- Испытания проводят под амплитудной нагрузкой путем плавного изменения частоты в заданном диапазоне от нижней к верхней в обратном.
- Частота перепада должна составлять 50 Гц. В диапазоне частот ниже частоты перепада подергивают постоянную амплитуду перепада, а выше частоты перепада - постоянную амплитуду ускорения.
- Скорость изменения частоты устанавливается равной 1 Ц/мин/мин.
- Испытание проводят при воздействии вибрации в двух взаимно перпендикулярных направлениях, если другие условия не указаны в технических требованиях.
- В процессе испытаний периодически контролируют параметры с учетом критериев годности изделия.

### Испытание на ударную устойчивость печатных плат

**Что регламентирует испытание?**

- Испытание проводят с целью проверить способность печатных плат выполнять свои функции в условиях механических ударов многократного действия.

### Испытание на ударную устойчивость печатных плат

**Основные этапы испытания:**

- Форма импульса ударного ускорения рекомендуется близкой к полусинусоиде.
- Изделия подвергают воздействию 20 ударов в каждом направлении воздействия, при этом частота следования ударов должна обеспечивать возможность контроля проверяемых параметров с учетом критериев годности печатной платы.
- За критерий годности печатной платы рекомендуется принимать целостность электрической цепи или стабильность контактного соединения.

### Испытание на воздействие синусоидальной вибрации

**Что регламентирует испытание?**

- Целью испытания является проверка аппаратуры групп В3, В4, В5, Н6, Н7 на стойкость при эксплуатации и групп С1 и С2 на прочность при транспортировании к воздействию синусоидальной вибрации.

### Испытание на воздействие синусоидальной вибрации

**Основные этапы испытания:**

- Испытания проводят на вибростенде. Характеристики испытательного режима должны соответствовать значениям, указанным в ГОСТ 16019-2001.
- Предварительно аппаратуру в выключенном состоянии без амортизаторов подвергают воздействию вибрации в течение 15 мин для обнаружения резонансов конструкции. При этом кошку или крышки должны быть сняты с целью визуального контроля колебаний элементов конструкции.

### Испытание на воздействие синусоидальной вибрации

**Характеристики испытательного режима должны соответствовать значениям, указанным в ГОСТ 16019-2001**

Виброиспытательный режим	Число циклов испытаний	Допускаемые значения параметров для аппаратуры группы			
		В3	В4	В5	Н6, Н7
1 - Состояние работоспособности	Длительность цикла, мин	10-15	10-100	10-100	10-100
	Число циклов испытаний	10	10	10	10
	Число циклов испытаний в год	10	10	10	10

### Испытание на воздействие синусоидальной вибрации

**Основные этапы испытания:**

- Этими процедурами испытывают на виброустойчивость или вибропрочность.
- Аппаратуру групп В3, В4, В5, Н6, Н7 испытывают во включенном состоянии, а группы С1 и С2 - во включенном состоянии и выключенной цепи. Включенная аппаратура подвергается воздействию трех взаимно перпендикулярных направлений, по 0,5 ч в направлении каждого из трех взаимноперпендикулярных направлений.

### Испытание на воздействие механических ударов

**Что регламентирует испытание?**

- Целью испытаний является проверка аппаратуры групп В3, В4, В5, Н6, Н7 на прочность к воздействию механических ударов при эксплуатации и для всех групп аппаратуры на прочность к воздействию механических ударов при транспортировании в упаковочной таре.

Испытание на воздействие механических ударов

Основные этапы испытания:

Печатаемые узлы и блоки

1

- Характеристики испытательного режима должны соответствовать значениям, указанным в ГОСТ 16019-2001

Масса падающего груза	Высота падения, мм	Масса испытательного образца, кг	Высота падения, мм			
			1000	500	250	100
100	1000	100	-	-	10	10
		200	-	-	20	20
200	1000	100	-	-	10	10
		200	-	-	20	20
500	1000	100	-	-	10	10
		200	-	-	20	20
1000	1000	100	-	-	10	10
		200	-	-	20	20

Испытание на свободное падение

Печатаемые узлы и блоки

Что требуется от испытателя?

- Целью испытания является проверка аппаратуры групп N6 и N7 на прочность при воздействии свободного падения

Основные этапы испытания:

1

- Аппаратуру в выключенном состоянии подвергают двукратному падению на каждого заданного образца - из положения, в котором она находится при эксплуатации

2

- Высотой падения является расстояние от площадки, на которую аппаратура падает (испытательная площадка), до самой ближайшей к этой площадке точки на образце в его положении перед падением

3

- Испытательная площадка состоит из бетона толщиной не менее 100 мм или стали толщиной не менее 16 мм, на которой уложена войлочная прокладка толщиной (3-5-6) мм

Далее

Испытание на свободное падение

Основные этапы испытания:

Печатаемые узлы и блоки

1

- Характеристики испытательного режима должны соответствовать значениям, указанным в ГОСТ 16019-2001

Скорость падения	Высота падения, мм, при массе, кг	Масса испытательного образца, кг
-	До 2	1000
	до 5	500
	до 10	250


11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Обзор САЕ-систем инженерного анализа

					<i>11.04.03.2018.570.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						76





**Nastran In-CAD (Autodesk)** **AUTODESK NASTRAN IN-CAD**

Основные возможности в задачах механики (используемые модели)

**Преимущества:**

- Моделирование нелинейности
- Модель сварного соединения
- Модель контакта с учетом трения
- Модель контакта без возможности проскальзывания по сложной поверхности
- Модель контакта без учета трения и без учета возможности отрыва

Назад к выбору САПР

**PLM Automation (Business PLM Software)** **SIEMENS**

Основные возможности в задачах механики (используемые модели)

**Потребительские модели:**

- Моделирование упругости
- Модель упругости нелинейности
- Модель расчета мезомасштабной анизотропии
- Модель расчета термической анизотропии
- Расчет напряжений остаточной упругости
- Расчет нелинейно упругих материалов
- Расчет упруго-пластичности
- Расчет упруго-вязкоупругости

**Преимущества:**  
 Присутствует возможность, оставаясь в одной и той же среде моделирования NX, использовать для решения различные ведущие промышленные решения, такие как MSC Nastran, MSC Strucsol, ANSYS, LS-Dyna и ABAQUS

Назад к выбору САПР

**Ассоника (ЦКП Ассоника)**

Подсистемы, решающие задачи механики

Ассоника-М	Ассоника-М-шпиф	Ассоника-М-3D
Ассоника-НД	Ассоника-В	Ассоника-ТМ
Ассоника-УСТ		

Назад к выбору САПР

**Ассоника (ЦКП Ассоника)**

Основные возможности в задачах механики (используемые модели)

**Специальные модели:**

- Модели расчета гармонических колебаний
- Модели расчета случайных колебаний
- Модели расчета ударов
- Модели расчета линейных усилений
- Модели расчета водовибраций акустического шума

Подсистема позволяет импортировать геометрию трехмерной модели FEM

**Ассоника (ЦКП Ассоника)**

Основные возможности в задачах механики (используемые модели)

**Специальные модели:**

- Модели расчета гармонических колебаний
- Модели расчета случайных колебаний
- Модели расчета ударов
- Модели расчета линейных усилений

Специальные модели импортируются с помощью шаблонов (структурных элементов)

- Шпиф
- Цилиндрический блок
- Кассетный блок
- Этажерочный блок
- Разные типы блоков с размещением ПУ на поверхности

• Моделирование жесткости

Модели любой конструкции являются параметрическими, имеется возможность ввода произвольного количества структурных элементов модели, размеры которых можно менять.
